

FLÁVIO JORGE PONZONI

APLICAÇÃO DO MODELO SAIL NO ESTUDO DA  
REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE DOSSÉIS DE  
MUDAS DE *Eucalyptus* sp. E DE *Aspidosperma* sp.

Tese apresentada ao Curso de Pós- Gradua-  
ção em Engenharia Florestal do Setor de  
Ciências Agrárias da Universidade Federal  
do Paraná como requisito para a obtenção  
do Título de Doutor em Ciências Florestais.  
Orientador: Prof. Attílio Antonio Disperati

CURITIBA  
1993

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

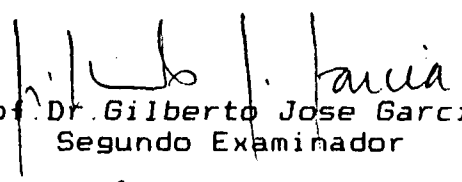
P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Tese de Doutorado apresentada pelo candidato FLAVIO JORGE PONZONI, sob o título "A REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE DOSSÉIS CONSTITUIDOS POR MUDAS DE ESSÊNCIAS FLORESTAIS" para obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração em MANEJO FLORESTAL, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Tese, com a média final: ( 9,2 ), correspondente ao conceito: ( A )

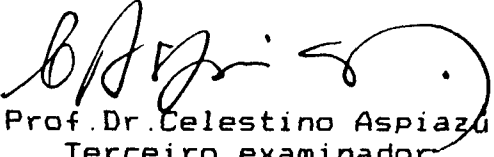
Curitiba, 05 de março de 1993



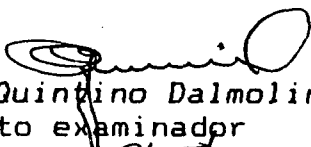
Prof. Dr. Antonio Roberto Formaggio  
Primeiro Examinador



Prof. Dr. Gilberto Jose Garcia  
Segundo Examinador



Prof. Dr. Celestino Aspiazu  
Terceiro examinador



Prof. Dr. Quintino Dalmolin  
Quarto examinador



Prof. Dr. Attilio Antonio Disperati  
Presidente da Banca

A meus pais,

Giorgio  
e  
Olympia

A um garoto que um dia sonhou  
tocar as estrelas,

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Ao Pesquisador, Dr. Raimundo de Almeida Filho, pelo voto de confiança à mim depositado, quando defendeu no Conselho de Pós-graduação do INPE minha idéia de cumprir um programa de auto-capacitação.

À DURAFLORA S/A, na pessoa do Eng. Florestal Antonio Joaquim de Oliveira, que sensibilizado pela importância do trabalho, viabilizou as condições necessárias para sua realização no que se referiu às coletas de dados radiométricos e biofísicos.

Aos colegas do Grupo de Vegetação da Divisão de Sensoriamento Remoto e Meteorologia Espacial (DSM/INPE), que foram compreensivos quando não puderam contar plenamente comigo no cumprimento das nossas atribuições diárias, tanto durante o período de meu afastamento, quanto durante o desenvolvimento do trabalho, já de volta ao INPE.

Aos membros do Comitê de Orientação, os Professores Dr. Attilio Antonio Disperati e Dr. Flávio Felipe Kirchner, e os Pesquisadores, Dr. Antonio Roberto Formaggio e Dr. José Carlos Neves Epiphânio, que tiveram uma participação sempre muito oportuna, e que com criatividade souberam orientar tanto a concepção quanto a redação do trabalho.

Ao desenhista da DSM/INPE, o Sr. Silvio Coimbra que com paciência elaborou muitas das figuras deste trabalho.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

FLÁVIO JORGE PONZONI, filho de Ponzoni Giorgio e Olympia Labate Ponzoni, nasceu em 04 de junho de 1957, na cidade de São Paulo, Brasil.

A vida estudantil foi iniciada no Colégio São Francisco de Assis, onde cursou até o ginásio que foi concluído em 1972. No ano seguinte, ingressou na Escola Técnica Roberto Simonsem (SENAI), onde, em 1976, concluiu o Curso Técnico em Máquinas e Motores.

Em 1977 ingressou no Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, onde graduou-se em julho de 1982, ingressando neste mesmo ano no Curso de Pós-graduação em Ciências Florestais (Mestrado) daquela universidade, tendo concluído-o em dezembro de 1984.

Em fevereiro de 1985 iniciou sua vida profissional como Pesquisador do então Departamento de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, desenvolvendo e/ou aplicando metodologias em sensoriamento remoto no estudo da vegetação.

Em março de 1989 iniciou o curso de Pós-graduação em Eng. Florestal (Doutorado), agora pela Universidade Federal do Paraná, tendo concluído-o na presente data, com a defesa deste trabalho.

Atualmente exerce o cargo de Pesquisador Adjunto da Divisão de Sensoriamento Remoto e Meteorologia Espacial do INPE (DSM/INPE).

## SUMÁRIO

<u>LISTA DE FIGURAS</u> .....	ix
<u>LISTA DE TABELAS</u> .....	x
<u>RESUMO</u> .....	xii
<u>ABSTRACT</u> .....	xiii
<u>1 INTRODUÇÃO</u> .....	1
1.1 HIPÓTESES.....	3
1.1.1 Dos parâmetros influentes na reflectância espectral dos dosséis.....	3
1.1.2 Do modelo de reflectância da vegetação.....	4
1.2 DOS OBJETIVOS.....	5
1.2.1 Objetivo geral.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
<u>2 REVISAO DE LITERATURA</u> .....	6
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.2 FUNDAMENTOS SOBRE A REFLECTÂNCIA DE DOSSÉIS.....	13
2.2.1 Fluxo radiante solar.....	13
2.2.2 Propriedades espectrais dos elementos da vegetação.....	13
2.2.3 Arquitetura do dossel.....	23
2.2.4 Espalhamento da REM pelo solo.....	36
2.3 MODELOS DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO.....	38
2.3.1 Modelos de meio turbido para dosséis homogêneos....	40
2.3.1.1 Teoria da Transferência radiativa.....	41
2.3.2 O modelo Suits.....	48
2.3.3 O modelo Sail.....	54
<u>3 MATERIAL E MÉTODOS</u> .....	62
3.1 OS PROGRAMAS SAIL E CANOPY.....	64
3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO SAIL.....	67
3.2.1 Índice de Área Foliar (IAF).....	69
3.2.2 Distribuição Angular de Folhas (DAF).....	70
3.2.3 Visada ( $\theta_v, \psi_v$ ).....	70
3.2.4 Iluminação ( $\theta_s, \psi_s$ ).....	71
3.2.5 Reflectância e Transmitância hemisféricas das folhas.....	71
3.2.6 Reflectância hemisférica do solo.....	72

3.2.7 Fração de irradiância difusa (SKYL).....	73
3.3 COLETA DE DADOS.....	73
3.3.1 Coleta de dados em campo.....	75
3.3.1.1 Elaboração dos dosséis.....	75
3.3.1.2 Coleta de dados biofísicos.....	79
3.3.1.3 Coleta de dados radiométricos.....	84
3.3.2 Determinação de $\rho$ , $\tau$ e $\rho_s$ .....	89
3.3.3 Geometria de iluminação.....	91
3.4 ORGANIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS COLETADOS E CALCULADOS.....	91
3.4.1 Registro e processamento dos dados coletados.....	92
3.4.2 Elaboração e processamento dos arquivos de dados...	95
3.4.3 Pareamento dos vetores (VMRs x VCRs).....	96
3.5 CRITÉRIOS E PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DOS VETORES PAREADOS.....	98
3.6 INVERSAO DO MODELO.....	99
4 <u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u> .....	102
4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	102
4.1.1 Índice de Área Foliar (IAF).....	102
4.1.2 Distribuição Angular das Folhas (DAF).....	105
4.1.3 Iluminação: Zênite e Azimute.....	111
4.1.4 Visada: Zênite e Azimute.....	112
4.1.5 Reflectância e Transmitância hemisféricas das folhas.....	116
4.1.6 Reflectância hemisférica do solo.....	119
4.1.7 Fração de Irradiância Difusa (SKYL).....	121
4.1.8 Considerações gerais sobre os resultados da análise de sensibilidade.....	122
4.2 PARÂMETROS BIOFÍSICOS.....	123
4.2.1 Índice de Área Foliar (IAF).....	123
4.2.2 Distribuição Angular de Folhas (DAF).....	125
4.3 PARÂMETROS RADIOMÉTRICOS.....	129
4.3.1 Reflectância e Transmitância hemisféricas das folhas e Reflectância hemisférica do solo ( $\rho$ , $\tau$ E $\rho_s$ ).....	129
4.3.2 Fração de Irradiância Difusa (SKYL).....	131
4.4 VALOR MEDIDO DE REFLECTÂNCIA (VMR) X VALOR CALCULADO DE REFLECTÂNCIA (VCR).....	132
4.4.1 Eucalipto.....	133

4.4.2 Peroba.....	144
4.4.3 Peroba + Eucalipto.....	153
4.5 ESTIMATIVA DE IAF ATRAVÉS DA INVERSÃO DO MODELO.....	161
5 <u>CONCLUSÕES</u> .....	168
5.1 DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DOS DOSSÉIS.....	168
5.1.1 Parâmetros biofísicos.....	168
5.1.2 Parâmetros espectrais.....	169
5.1.2 Parâmetros geométricos (da fonte e do sensor).....	169
5.2 DO DESEMPENHO DO MODELO.....	170
5.3 DA INVERSÃO DO MODELO.....	171
6 <u>SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES</u> .....	172
6.1 DA ELABORAÇÃO OU ESCOLHA DOS DOSSÉIS.....	172
6.2 DO MODELO DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO.....	173
APÊNDICE A-DESCRIÇÃO DA SUBROTINA SCR DO MODELO SAIL.....	174
APÊNDICE B-ÁREAS DAS 100 FOLHAS UTILIZADAS NA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR.....	186
APÊNDICE C-COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS VMRS E DOS VCRs DO DOSSEL DE EUCALIPTO.....	189
APÊNDICE D-COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS VMRS E DOS VCRs DO DOSSEL DE PEROBA.....	192
APÊNDICE E-COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS VMRS E DOS VCRs DO DOSSEL DE PEROBA+EUCALIPTO.....	195
<u>GLOSSÁRIO</u> .....	199
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> .....	200



## LISTA DE FIGURAS

2.1 ÂNGULOS E PLANOS ENVOLVIDOS NAS GEOMETRIAS DE ILUMINAÇÃO E DE VISADA.....	9
2.2 SISTEMA REFERENTE AO SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO	11
2.3 REFLECTÂNCIA, TRANSMITÂNCIA E ABSORTÂNCIA DE FOLHAS DE <i>Ilex cornuta</i> .....	15
2.4 FDRB E FDTB DE FOLHAS DE SOJA.....	17
2.5 POSSÍVEIS TRAJETÓRIAS DA REM INCIDENTE SOBRE UMA FOLHA	20
2.6 CURVA TÍPICA DE REFLECTÂNCIA DE UMA FOLHA VERDE.....	21
2.7 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS TIPOS DE DAFs.....	26
2.8 GEOMETRIA DO DOSSEL INFLUENCIANDO EM SUA REFLECTÂNCIA.	28
2.9 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM DOSSEL COMO UM MEIO DE PROPAGAÇÃO DE REM.....	43
2.10 SIMPLIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO SUITS.....	49
3.1 FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS....	62
3.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA CIDADE DE LENÇÓIS PAULISTA..	74
3.3 ASPECTO DO CANTEIRO DE EUCALIPTO.....	76
3.4 ASPECTO DO CANTEIRO DE PEROBA.....	77
3.5 ORIENTAÇÃO DOS DOSSÊIS NO TERRENO.....	78
3.6 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS FOLHAS.....	82
3.7 CONFIGURAÇÃO DO SPECTRON-SE 590.....	84
3.8 DIMENSÕES DOS IFOVs NO TOPO DO DOSSEL DE EUCALIPTO....	86
3.9 ÂNGULOS QUE CARACTERIZARAM AS GEOMETRIAS DE ILUMINAÇÃO E DE VISADA, SEGUNDO A ORIENTAÇÃO ESPACIAL DOS CANTEIROS NO TERRENO.....	89
4.1 AZIMUTES DE VISADA EM RELAÇÃO AO AZIMUTE SOLAR.....	116
4.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MÉDIAS DAS QUATRO BANDAS EM RELAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES DE $\rho$ E $\tau$ .....	118
4.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DOS ÂNGULOS FOLIARES DOS DOSSÊIS DE EUCALIPTO E PEROBA....	128
4.4 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VETORES $\rho$ , $\tau$ E $\rho_s$ .....	130
4.5 VMR X VCR PARA O DOSSEL DE EUCALIPTO.....	134
4.6 DIFERENÇAS ENTRE VMR E VCR PARA O DOSSEL DE EUCALIPTO.	142
4.7 VMR X VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA.....	145
4.8 DIFERENÇAS ENTRE VMR E VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA....	152
4.9 VMR X VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA + EUCALIPTO.....	154
4.10 DIFERENÇAS ENTRE VMR E VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA + EUCALIPTO VIA VERSAO SAIL.....	159
4.11 DIFERENÇAS ENTRE VMR E VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA + EUCALIPTO VIA VERSAO CANOPY.....	160

## LISTA DE TABELAS

2.1 DAFs QUE DESCREVEM OS SEIS TIPOS DE DOSSÉIS.....	26
2.2 RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DESCRITOS NO MODELO SUITS, OS PARÂMETROS DO DOSEL E OS PARÂMETROS DA TEORIA KM..	50
2.3 DEPENDÊNCIAS FUNCIONAIS DOS COEFICIENTES DOS MODELOS SUITS E SAIL EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS FOLHAS.....	55
2.4 QUADRO DE DECISÃO PARA OS ÂNGULOS AZIMUTAIS AUXILIARES	56
3.1 ARQUIVO DE DADOS DO PROGRAMA SAIL.....	66
3.2 ARQUIVO DE DADOS DO PROGRAMA CANOPY.....	67
3.3 CLASSES ANGULARES DA DAF.....	83
3.4 DIMENSÕES DOS IFOVs NOS TOPOS DOS DOSSÉIS DE EUCALIPTO E DE PEROBA.....	85
3.5 HORÁRIOS DE REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES RADIOMÉTRICAS.....	88
3.6 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ARQUIVOS DOS VETORES PAREADOS.....	97
4.1 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE IAF.....	103
4.2 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES DAFs E IAF=0,5.....	106
4.3 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES DAFs E IAF=4,0.....	109
4.4 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES HORÁRIOS.....	111
4.5 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE $\Theta_v$ .....	113
4.6 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE $\psi_v$ .....	115
4.7 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES $\rho$ E DE $\tau$ ...	117
4.8 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE $\rho_s$ .....	120
4.9 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VETORES SKYL.....	121
4.10 VALORES DE IAF PARA CADA IFOV E TIPO DE DOSEL.....	124
4.11 ERROS ESTIMADOS DEVIDO À INTENSIDADE AMOSTRAL.....	125
4.12 VALORES DAS FREQUÊNCIAS RELATIVAS DAS CLASSES DA DAF.	126
4.13 VALORES DAS FREQUÊNCIAS RELATIVAS DAS CLASSES DA DAF USADAS NO PROGRAMA CANOPY.....	127
4.14 EXEMPLOS DE VETORES SKYL UTILIZADOS.....	132
4.15 VALORES DE RQMP PARA O DOSEL DE EUCALIPTO.....	139

4.16	VALORES DE RQMP PARA O DOSSEL DE PEROBA.....	150
4.17	VALORES DE RQMP PARA O DOSSEL DE PEROBA+EUCALIPTO....	157
4.18	ESTIMATIVAS DE IAF PARA O DOSSEL DE EUCALIPTO.....	161
4.19	ESTIMATIVAS DE IAF PARA O DOSSEL DE PEROBA.....	165
4.20	ESTIMATIVAS DE IAF PARA O DOSSEL DE PEROBA+EUCALIPTO.	167

## RESUMO

O modelo SAIL ("Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves") foi aplicado ao estudo da reflectância espectral de dosséis constituídos por mudas de *Eucalyptus* sp. (Eucalipto) e de *Aspidosperma* sp. (Peroba) produzidas no viveiro de mudas da DURAFLOA S/A, localizado no município de Lençóis Paulista SP. Foram elaborados três diferentes dosséis, sendo um constituído por mudas de Eucalipto, outro por mudas de Peroba e finalmente um terceiro dossel constituído por mudas de ambas as espécies na proporção de 50% cada. Medições radiométricas foram realizadas em cada um destes dosséis em diferentes horários do dia, os quais caracterizaram diferentes condições de iluminação. Nestas medições foram ainda considerados os ângulos zenitais de visada de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$  e o uso do radiômetro SPECTRON SE-590 que atua dentro do intervalo espectral compreendido entre  $0,4 \mu\text{m}$  à  $0,9 \mu\text{m}$ . Através destas medições radiométricas foram determinados os Valores Medidos de Reflectância (VMRs). Foram determinados os parâmetros biofísicos (IAF e DAF) destes dosséis, os parâmetros espectrais das folhas de ambas as espécies e do solo e ainda os parâmetros geométricos de iluminação. Estes parâmetros foram submetidos ao processamento do modelo SAIL para a determinação dos Valores Calculados de Reflectância (VCRs). Estes VCRs foram então comparados com seus respectivos VMRs para a avaliação da dinâmica dos VMRs, em relação às condições de iluminação e de visada consideradas, e do desempenho do modelo. Verificou-se que com o aumento do IAF, houve a diminuição dos VCRs na região do visível e seu aumento na região do infravermelho. Esta dinâmica não foi tão evidente nos VMRs devido à influência de fatores como sombras (na região espectral do visível) e orvalho (na região espectral do infravermelho). A ação da DAF sobre os VMRs deve ser analisada conjuntamente com a densidade do dossel e com as geometrias de iluminação e de visada. Os parâmetros espectrais das folhas ( $\rho$  e  $\tau$ ) exerceram influência sobre os VCRs. A análise da influência dos parâmetros geométricos da fonte e do sensor sobre os VMRs deve levar em consideração a densidade do dossel, a disposição ou não das plantas em fileiras, bem como a orientação espacial destas fileiras. Para dosséis densos e visada vertical, a diminuição do valor do ângulo zenital solar, acarretou o aumento dos VMRs, principalmente na região do visível. Na região do infravermelho a comprovação deste efeito foi prejudicada pela presença do orvalho e de sua evaporação coincidente com a diminuição do ângulo zenital solar. Para dosséis menos densos a plantas dispostas em fileiras, o aumento dos VMRs na região do visível com a diminuição do ângulo zenital solar foi atribuído à diminuição do sombreamento mútuo das plantas e do solo. Na região do infravermelho, houve também o aumento dos VMRs com a diminuição do ângulo zenital solar. O efeito do ângulo zenital de visada sobre os VMRs deve ser analisado conjuntamente com o valor do azimute relativo ( $\psi$ ). As diferenças entre os VMRs e seus respectivos VCRs foram freqüentemente superiores à 10%. Foi ainda viabilizado o procedimento de inversão do modelo visando a estimativa do IAF, sem a obtenção de resultados satisfatórios.

## ABSTRACT

A canopy reflectance model called Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves (SAIL) was applied to a spectral reflectance study of *Eucalyptus* sp. (Eucalipto) and *Aspidosperma* sp. (Peroba) seedling canopies, which have been cultivated in a forestry nursery of DURAFLOA S/A, located in Lençóis Paulista (SP) town. Three different canopies were studied. The first one was composed by Eucalipto seedlings, the second one by Peroba seedlings and the third one was composed by seedlings of these two species (50% of each one). Radiometric measurements were carried out considering different times of day, exploring several illumination conditions. The view zenith angle was also changed during these measurements. It was used the SPECTRON SE-590 radiometer with the spectral range from 0.4  $\mu\text{m}$  to 0.9  $\mu\text{m}$ . Through these radiometric data the Observed Reflectance Value (VMRs) were determined. The biophysical parameters (IAF and DAF), the leaves and soil spectral properties and the illumination/view geometry were used in the model processing in order to determine the Calculated Reflectance Values (VCRs). These VCRs were compared with the VMRs to evaluate the canopy reflectance dynamic and the model performances. The increase in IAF caused a decrease in the VCRs in visible region and a VCRs increase in infrared region. That dynamic was not so easily observed in the VMRs due shadow (in the visible region) and dew (infrared spectral range) influence. The DAF influence has to be analysed considering both canopy density and illumination/view geometry. The leaves spectral parameters ( $\rho$  and  $\tau$ ) were the most VCRs influential. The analysis of the influence of source and sensor geometric parameters in the VMRs has to consider the canopy density and the row orientation. Considering compact canopies and vertical view, as sun zenith angle decreased, the VMRs increased, mainly in the visible region. In infrared region this dynamic was not confirmed due dew and its evaporation during the day. For sparse canopies and plants oriented by rows, the increase of VMRs, in the visible region, with the decrease of zenith solar angle was attributed to plants and soil shadowing decrease. In infrared region, the VMRs increased as sun zenith angle decreased. The view zenith angle effect must be analysed considering the related azimuth angle ( $\psi$ ) values. Differences between VMRs and VCRs were frequently greater than 10%. A model inversion procedure was developed in order to estimate IAF values, but with not successful results.

## 1 INTRODUÇÃO

As técnicas de Sensoriamento Remoto são viabilizadas através de três componentes fundamentais: a fonte de radiação eletromagnética (REM), o objeto de estudo e o sensor. A própria REM constitui um elemento de ligação entre estes componentes através de um processo de interação bastante complexo.

A utilização destas técnicas para o estudo dos recursos naturais, vale-se de três diferentes domínios: o domínio espacial, o domínio temporal e o domínio espectral. No domínio espacial são exploradas as características dimensionais e de forma dos recursos naturais, bem como as potencialidades intrínsecas dos sensores no registro destas características. No domínio temporal é explorada a ação de períodos de tempo, quer seja devido a alterações sazonais, ou devido à ação antrópica. Finalmente, no domínio espectral são exploradas as propriedades relacionadas à reflexão, à transmissão e à absorção da REM, considerando diversas regiões do espectro eletromagnético.

No que se refere à este último domínio, existe uma perspectiva concreta, para os próximos anos, de disponibilidade de dados coletados a partir de sensores dotados de resoluções espectrais e radiométricas finas. Este fato tem estimulado pesquisadores em todo o mundo à adquirir um conhecimento mais aprofundado sobre o processo de interação mencionado.

Uma vez que o fenômeno de reflexão da REM, por parte dos recursos naturais, tem sido o mais explorado quando da consideração das técnicas de Sensoriamento Remoto, a reflectância espectral tem assumido grande importância quando do interesse da otimização da utilização de dados coletados remotamente.

O processo de interação entre os recursos naturais e a REM tem sido estudado através da dinâmica da reflectância espectral, sob a ação de fatores endógenos e exógenos a estes recursos.

Para o caso da vegetação, os resultados destes estudos têm sido materializados sob a forma dos chamados Modelos de Reflectância da Vegetação, que promovem uma conexão lógica entre os parâmetros relativos à própria vegetação, às geometrias de iluminação e de visada, e às alterações sofridas pela REM refletida por dosséis vegetais.

É o caso do modelo denominado "Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves" (SAIL), cujos desempenhos têm sido avaliados quanto às estimativas da reflectância espectral de dosséis de culturas agrícolas, incluindo algumas proposições de inversão visando a estimativa de parâmetros biofísicos, sabidamente relacionados à produtividade destas culturas.

Não foram ainda identificadas na literatura aplicações deste modelo para dosséis de porte florestal, a não ser algumas adaptações implementadas visando tal aplicação, sem contudo terem sido apresentados resultados experimentais destas adaptações.

No Brasil, este e outros modelos começaram a se tornar disponíveis no início dos anos 90, restando ainda muitas incertezas quanto às suas potencialidades e limitações de uso para as condições tropicais. Ainda, não se dispõe de conhecimento devidamente sedimentado sobre os parâmetros influentes sobre a reflectância espectral de dosséis, nem tampouco da forma e magnitude desta influência.

Estes parâmetros são comumente classificados como: biofísicos, espectrais e geométricos. Os parâmetros biofísicos referem-se ao índice de Área Foliar (IAF) e à Distribuição Angular de Folhas (DAF), os quais caracterizam a arquitetura do dossel. Os parâmetros espectrais referem-se àqueles que caracterizam as propriedades de reflexão e transmissão da REM por parte dos elementos constituintes de um dossel (folhas, flores, frutos, galhos, etc). E finalmente os parâmetros geométricos caracterizam a localização espacial da fonte de REM e do sensor, através de medidas angulares.

A seguir são apresentadas as hipóteses que motivaram a realização deste trabalho.

## 1.1 HIPÓTESES

### 1.1.1 Dos parâmetros influentes na reflectância espectral de dosséis

- a) Índice de Área Foliar (IAF): o aumento do IAF acarreta a diminuição da reflectância espectral de um dossel, referente à região do visível e seu aumento na região do infravermelho;



- b) Distribuição Angular de Folhas (DAF): o efeito do ângulo de inclinação das folhas sobre a reflectância de um dossel deve ser analisado conjuntamente com as geometrias de iluminação e de visada;
- c) quando mais de um tipo de folha constitui um dossel, a reflectância espectral deste dossel não deve ser estimada através do modelo utilizando-se da média aritmética das reflectâncias espectrais hemisféricas destes diferentes tipos de folhas;
- d) para o caso de dosséis planófilos e com valores elevados de IAF, a geometria de iluminação exerce pouca influência em suas reflectâncias;
- e) para o caso de dosséis planófilos e com valores baixos de IAF, a geometria de iluminação exerce influência em suas reflectâncias espectrais;
- f) para uma mesma situação geométrica de iluminação, a alteração do ângulo zenital de visada acarreta alterações na reflectância espectral de um dossel.

#### 1.1.2 Do modelo de reflectância da vegetação

- a) o modelo deve atingir diferentes desempenhos em função dos parâmetros biofísicos dos dosséis e das condições geométricas de iluminação e de visada;
- b) os valores de reflectância espectral calculados pelo modelo em diferentes situações de iluminação e de visada devem apresentar as mesmas tendências e amplitudes daquelas apresentadas pelos valores de reflectância espectral medidos em campo.

## 1.2 DOS OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Aplicar o modelo SAIL de reflectância da vegetação no estudo da reflectância espectral de dosséis constituídos por mudas de *Eucalyptus* sp. e de *Aspidosperma* sp..

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) coletar dados radiométricos de dosséis constituídos por mudas de duas espécies, sob diferentes condições geométricas de iluminação e de visada;
- b) determinar os valores dos parâmetros influentes na reflectância espectral destes dosséis, para as condições de realização das coletas de dados radiométricos;
- c) submeter os valores determinados no item b) ao processamento do modelo SAIL e avaliar o seu desempenho, comparando os valores de reflectância determinados em campo com aqueles determinados através do processamento do modelo;
- d) viabilizar a inversão do modelo visando a estimativa do Índice de Área Foliar (IAF).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sensoriamento remoto nas regiões espectrais do visível até o infravermelho médio, aplicado ao estudo da cobertura vegetal, é baseado em medidas da REM refletida por dosséis. Desde que esta REM refletida seja coletada através de um ângulo sólido, a radiância espectral é o parâmetro que, em última instância, é detectado e registrado por sensores localizados remotamente.

BUNNIK(1978) considera que a radiância espectral provinda de um dossel e detectada por um sensor posicionado remotamente é dada por:

$$La(\theta_v, \theta_s, \psi, A, h, \lambda, t) = Li(\theta_v, \theta_s, \psi, A, \lambda, t) * T(\theta_v, A, h, \lambda, t) + Lp(\theta_v, \theta_s, \psi, A, h, \lambda, t) \quad (1)$$

onde:  $La$  = radiância aparente detectada pelo sensor;

$Li$  = radiância intrínseca do dossel em seu limite superior;

$T$  = transmitância atmosférica;

$Lp$  = trajetória da radiância na atmosfera;

$A$  = parâmetro genérico que expressa o estado da atmosfera;

$h$  = distância entre o sensor e a superfície terrestre;

$\theta_v$  = ângulo zenital de visada;

$\theta_s$  = ângulo zenital solar;

$\psi$  = azimuth relativo entre o Sol e o sensor;

$\lambda$  = comprimento de onda;

$t$  = tempo.

O parâmetro  $La$  é dito aparente porque, uma vez determinado através de dados coletados remotamente, ele não

representa fielmente Li (que é aquele realmente representativo das características do dossel), pois traz consigo uma grande influência dos demais parâmetros geométricos e espectrais da iluminação, visada e atmosfera.

Com relação à influência da atmosfera, sua composição e distribuição de aerossóis são os fatores mais relevantes na sua transmitância e nas propriedades de espalhamento da REM, e esta transmitância pode ser determinada através de métodos empíricos e/ou por modelos matemáticos.

Sobre o valor de Li exercem também influência os parâmetros geométricos de iluminação e de visada, bem como os espectrais do Sol e da atmosfera tendo, esta última, influência somente na trajetória de incidência da REM sobre o dossel; e ainda aqueles parâmetros inerentes às características geométricas e espectrais dos componentes do dossel. Contudo, Li não é o parâmetro mais adequado para se estudar a interação da REM com a vegetação, uma vez que ele também é dependente da intensidade da REM radiada pelo Sol. Assim a reflectância espectral assume aqui uma importância fundamental.

Os estudos envolvendo a reflectância espectral de dosséis foram motivados principalmente pela necessidade de se correlacionar o tom e/ou padrão apresentado por estes em fotografias aéreas e/ou em imagens orbitais de uma ou mais faixas espectrais. COLWELL(1974) considera que muitos resultados alcançados na tentativa de determinar o significado deste tom e/ou padrão mostraram-se anômalos ou no mínimo contraditórios. O autor atribui a isto o fato de que muitos

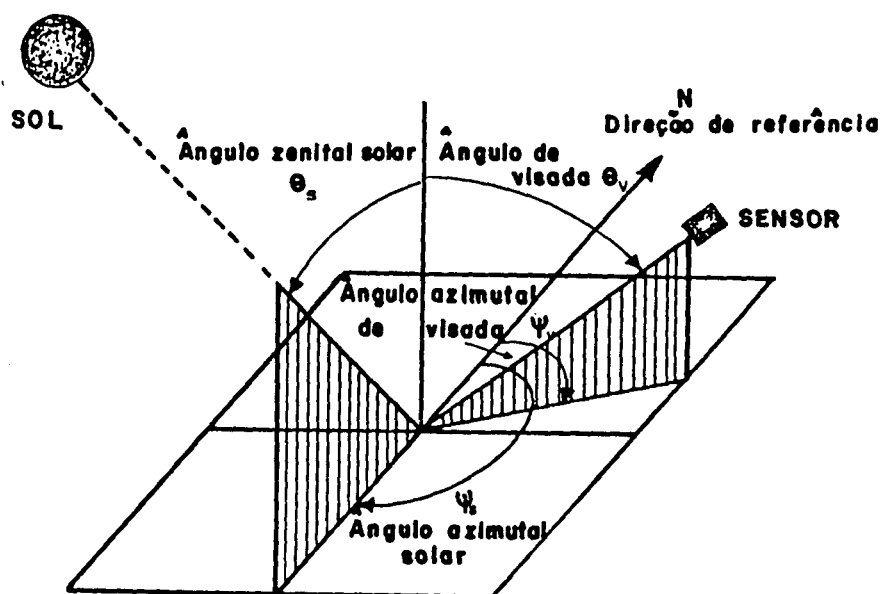
pesquisadores não têm levado em consideração as verdadeiras relações de causa e efeito envolvidas no processo de obtenção destes tom e/ou padrão; e ainda porque outros pesquisadores têm se valido somente da reflectância hemisférica das folhas como parâmetro para a predição e compreensão da aparência assumida por um dossel, principalmente em imagens orbitais. O autor enfatiza ainda que a reflectância espectral bidirecional de folhas é o parâmetro melhor correlacionado a essa aparência mencionada, aliado ainda a outros parâmetros como a transmitância das folhas, suas quantidades e arranjo, características dos demais componentes do dossel (galhos, frutos, flores, etc), características do solo, ângulo zenital solar, ângulo de visada e ângulo azimutal relativo (da fonte e do sensor). A Figura 2.1 apresenta os ângulos mencionados (fonte e sensor).

Como consequência de observações como estas, seguiram-se estudos direcionados para uma maior compreensão sobre a participação de cada um destes parâmetros na reflectância do dossel, os quais incluíram a proposição de modelos matemáticos fundamentados na física da interação entre a radiação solar e os dosséis.

Talvez GOEL(1988) tenha conseguido mais didaticamente apresentar as bases conceituais dessa interação, e sobre os modelos que tentam descrevê-la, incluindo uma revisão minuciosa da literatura pertinente. Para este autor, a radiação solar incidente sobre um dossel é espalhada e refletida, tendo sua direção e composição espectral alteradas de maneira bastante complexa. Essa alteração é causada tanto

por parâmetros inerentes ao próprio dossel, quanto por fatores ambientais. Para propostas do sensoriamento remoto da vegetação, GOEL(1988) considera fundamental a especificação e entendimento destes parâmetros e influências.

FIGURA 2.1 ÂNGULOS E PLANOS ENVOLVIDOS NAS GEOMETRIAS DE ILUMINAÇÃO E DE VISADA



Fonte: DANSON (1985)

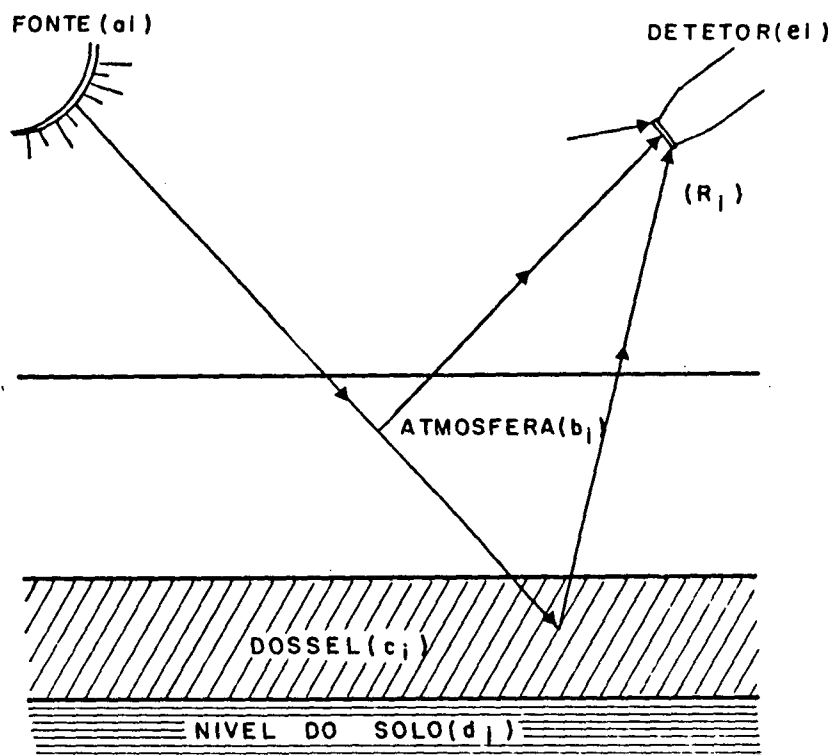
GOEL(1988) definiu ainda um sistema pertinente ao sensoriamento remoto da vegetação a partir de dados de reflectância espectral, o qual é constituído pelos seguintes sub-sistemas:

- a) fonte de radiação: normalmente trata-se do Sol e é definida por uma série de propriedades/ parâmetros, representados pelo conjunto  $\{a_i\}$ , que incluem a intensidade espectral  $I_\lambda$  e a localização ( $\theta_s$  = ângulo zenital solar e  $\psi_s$  = ângulo azimutal solar);

- b) atmosfera: caracterizada por uma série de propriedades /parâmetros representados por  $\{b_i\}$ , incluindo as concentrações espacialmente dependentes e propriedades seletivas de absorção e de espalhamento dos diversos comprimentos de onda por parte de aerossóis, vapor d'água e ozônio;
- c) dossel: caracterizado por uma série de propriedades /parâmetros, representados por  $\{c_i\}$ , incluindo os parâmetros óticos (reflectância e transmitância) e estruturais (formas geométricas e posições) dos componentes da vegetação (folhas, galhos, frutos, etc), geometria de plantio e parâmetros ambientais como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação. Em geral estes parâmetros apresentam dependências espectrais, espaciais e temporais;
- d) solo: caracterizado por uma série de propriedades/parâmetros, representados por  $\{d_i\}$ , tais como reflectância e absorptância, rugosidade superficial, textura e umidade;
- e) detector: caracterizado por uma série de propriedades/parâmetros representados por  $\{e_i\}$ , os quais definem sua sensibilidade espectral, abertura, calibração e posição espacial ( $\theta_v$  = ângulo zenital de visada e  $\psi_v$  = ângulo azimutal de visada).

A Figura 2.2 representa esquematicamente o sistema referente ao sensoriamento remoto da vegetação apresentado por GOEL e STREBEL(1983) e por GOEL(1988).

FIGURA 2.2 SISTEMA REFERENTE AO SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO



Fonte: GOEL(1988)

A radiação solar incide no topo da atmosfera e parte dessa radiação é espalhada e/ou refletida pelas partículas atmosféricas. Outra parte atravessa a atmosfera e é espalhada/refletida pelo dossel ou solo. A radiação espalhada/ refletida é então detectada por um sensor (detetor) que pode estar acoplado a um suporte posicionado a poucos metros da superfície terrestre, ou em plataformas aerotransportadas como aviões ou satélites.

Assim, pode-se definir a série {R<sub>i</sub>} de atributos da radiação recebida pelo sensor como:

$$R_i = f(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i) \quad (2.2)$$



Onde a função  $f$  envolve o processo de transferência radiativa que produz a série  $\{R_i\}$ .

GOEL(1988) considera que existem dois aspectos relevantes a serem considerados no estudo da relação entre a radiação detectada e os parâmetros deste sistema total. O primeiro envolve a definição de uma função ou algoritmo ( $f$ ) o qual define  $\{R_i\}$ , dadas as características do sistema ( $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ , e  $e_i$ ). Este aspecto é definido pelo autor como problema direto. O segundo envolve a definição de uma função, relação ou algoritmo ( $g$ ) que gera a série  $\{c_i\}$  de propriedades/parâmetros da vegetação a partir dos valores medidos  $\{R_i\}$ . Simbolicamente, tem-se que:

$$\{c_i\} = g(R_i, a_i, b_i, d_i, e_i) \quad (2.3)$$

Este último aspecto é definido por GOEL(1988) como o problema inverso, ou o problema de estimar os parâmetros do dossel a partir de dados de reflectância.

Usualmente a solução do problema direto é um pré-requisito para a solução do problema inverso, porém o autor considera que uma vez que o número de medidas de reflectância é menor do que o número de parâmetros utilizados em sua determinação, o problema inverso é mais difícil de se resolver. Porém, tem uma relevância prática muito grande, pois sua solução permite a estimativa dos parâmetros da vegetação minimizando, ou até mesmo tornando dispensáveis trabalhos de campo visando suas determinações.

## 2.2 FUNDAMENTOS SOBRE A REFLECTÂNCIA DE DOSSÉIS

Os principais aspectos relacionados com os fundamentos conceituais sobre a interação da REM solar com um dossel, os quais foram apresentados por GOEL(1988), são os seguintes:

#### 2.2.1 Fluxo radiante solar

O fluxo solar incidente sobre um dossel é constituído por duas partes: uma fração da radiação que não é absorvida ou espalhada pela atmosfera, por isso denominada fluxo direto, e outra fração que é espalhada pela atmosfera na direção descendente, incidindo sobre o dossel na forma difusa (fluxo difuso). Esta última fração é denominada por GOEL(1988) como SKYL, e é dependente das condições atmosféricas (especialmente poeira e vapor d'água) e varia com o comprimento de onda, sendo maior na região do visível ( $0,4\mu\text{m}$  a  $0,7\mu\text{m}$ ) do que na região do infravermelho próximo ( $0,8\mu\text{m}$  a  $1,1\mu\text{m}$ ). A direção do fluxo solar direto é caracterizada pelos ângulos zenital ( $\theta_s$ ) e azimutal ( $\psi_s$ ) solares, enquanto que a direção do fluxo difuso solar é caracterizado pela sua distribuição angular.

#### 2.2.2 Propriedades espectrais dos elementos constituintes dos dosséis

Como mencionado anteriormente, um dossel é constituído por muitos elementos da própria vegetação, assim como folhas, troncos, galhos, flores, etc. Um fluxo de radiação incidente sobre qualquer um destes elementos está sujeito a dois processos: espalhamento e absorção. O processo de espalhamento, por sua vez, pode ser dividido em dois sub-processos: reflexão e transmissão através do elemento. O destino do fluxo radiante incidente sobre um destes elementos

é então dependente das características do fluxo (comprimento de onda, ângulo de incidência e polarização) e das características destes elementos (propriedades superficiais, estrutura celular, composição química, etc.). Considerando a folha como um destes elementos, TUCKER e GARRAT (1977) propuseram um modelo para quantificar estas dependências.

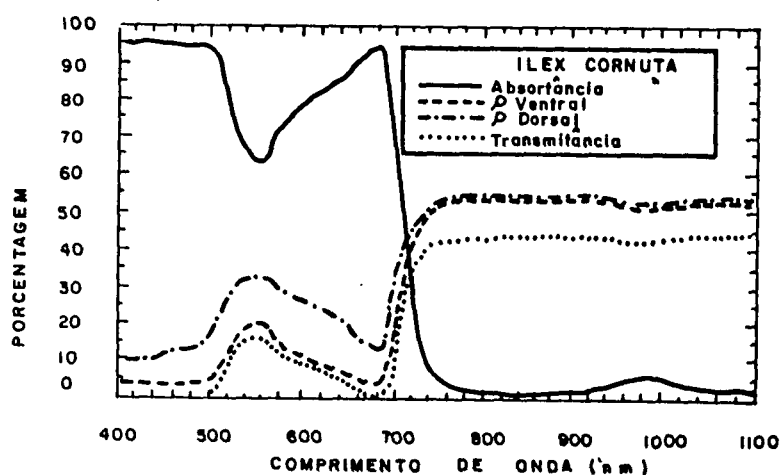
A reflexão da REM por parte de uma folha é constituída por duas partes: a reflexão especular, na qual o ângulo de incidência é igual ao de reflexão, e a reflexão difusa. Da mesma forma, a transmissão da REM por parte de uma folha também é constituída de duas partes: a refratada e a difusa. As quantidades relativas dos fluxos diretos e difusos dependem das características do elemento da vegetação e do fluxo de radiação incidente. GOEL(1988) menciona que a dependência direcional dos fluxos difusos pode ser muito complexa.

Na literatura existem muitos trabalhos relacionados a determinação das propriedades espectrais de folhas, destacando-se GATES et al. (1965), GAUSMAN et al. (1969), GAUSMAN et al. (1971), KUMAR (1972), SINCLAIR et al. (1973) GAUSMAN (1974), FURKSHANSKY (1981) e LILLESAETER (1982). Destes trabalhos, destaca-se a extensa revisão sobre os processos de reflexão e emissão da REM por parte de folhas e dosséis, realizada por KUMAR (1972).

Tanto GOEL(1988) quanto KUMAR(1972) concordam que a maioria dos trabalhos disponíveis na literatura que incluem estudos das propriedades espectrais de folhas isoladas, tem sido realizada com fontes de REM posicionadas verticalmente (normal) ou próximo disso, utilizando ainda esferas

integradoras que coletam toda a radiação emanada ora da face ventral, ora da face dorsal da folha. Estas medidas se referem à reflectância espectral hemisférica ( $\rho$ ) ou transmitância espectral hemisférica ( $\tau$ ). O conhecimento concomitante de ambos os parâmetros mencionados permite o cálculo da absorptância espectral hemisférica ( $a$ ), uma vez que  $a=1-(\rho+\tau)$ . A Figura 2.3 apresenta as reflectância, transmitância e absorptância como uma função do comprimento de onda para folhas de *Ilex cornuta* que são finas e muito refletivas (GATES et al., 1965).

FIGURA 2.3 REFLECTÂNCIA, TRANSMITÂNCIA E ABSORTÂNCIA DE FOLHAS DE *Ilex cornuta*



Fonte: GATES et al. (1965)

Através da análise desta Figura 2.3, pode-se verificar os seguintes aspectos relacionados às propriedades espectrais das folhas em questão:

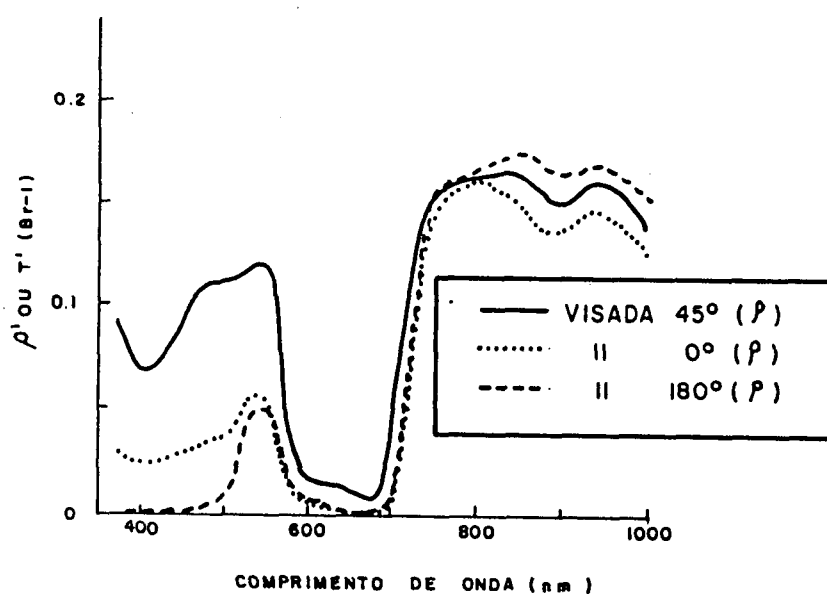
- a) a reflectância da face dorsal é diferente (mais alta) do que a da face ventral, e esta distinção é dependente do comprimento de onda, sendo mais notável na região do visível do que no infravermelho;
- b) a reflectância, a transmitância e a absortância dependem do comprimento de onda, sendo que na região do visível, tanto a reflectância quanto a transmitância são pequenas, uma vez que a absortância é alta devido ao fenômeno de fotossíntese; na região compreendida entre  $0,7\mu\text{m}$  a  $0,8\mu\text{m}$ , ambos os parâmetros aumentam rapidamente, atingindo seus máximos na região do infravermelho próximo, quando a absortância torna-se mínima.

A dependência com os comprimentos de onda, mencionada na alínea b), é considerada por GOEL (1988) como fundamental para o sensoriamento remoto da vegetação, uma vez que é através dela que são viabilizados os estudos.

GOEL (1988) considera ainda que, em geral, a descrição da radiação espalhada por uma folha depende das direções de incidência e espalhamento. Existem poucas medidas disponíveis na literatura destinadas ao entendimento desta dependência. É o caso de BREECE e HOLMES (1971) que realizaram medidas de reflectância de folhas de milho e soja com ângulos de incidência de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ , mantendo os ângulos de visada no plano principal. Estas medidas mostraram uma forte dependência da reflectância (podendo ser estendida as mesmas conclusões para a transmitância) com o ângulo de incidência e comprimentos de onda. Em outras palavras, o espalhamento da

radiação por parte de ambos os tipos de folhas mencionados é dito não-isotrópico ou não-Lambertiano. Neste caso a reflectância espectral destas folhas é caracterizada pela Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (FDRB), enquanto que a transmitância espectral é caracterizada pela Função de Distribuição de Transmitância Bidirecional (FDTB). A Figura 2.4 ilustra as FDRBs para ângulos de visada de  $45^\circ$  e  $0^\circ$  e a FDTB para um ângulo de visada de  $180^\circ$ , ambas versus os comprimentos de onda com um ângulo de incidência de  $45^\circ$ .

FIGURA 2.4 FDRB E FDTB DE FOLHAS DE SOJA



Fonte: BREECE e HOLMES(1971)

NORMAN et al.(1985) e WALTER-SHEA(1987), apud GOEL(1988) estenderam estas medidas para incluir ângulos de visada fora do plano principal. Através dos resultados destes trabalhos, pode-se inferir sobre as seguintes propriedades para o espalhamento da REM por parte de uma folha:

- a) as distribuições de reflectância, tanto na região do visível quanto no infravermelho se caracterizam por aumentos nos valores de reflectância com o aumento do ângulo zenital de visada para a maioria dos ângulos azimutais;
- b) o retroespalhamento (isto é, o espalhamento na direção da incidência da REM) é maior na região do infravermelho do que na região do visível, e as formas das FDRBs nas regiões do visível e infravermelho são diferentes na direção do retroespalhamento;
- c) para ângulos de incidência próximos à normal, a FDRB pode ser aproximadamente considerada como de uma superfície Lambertiana, de forma que com o aumento do ângulo zenital da fonte de iluminação, a folha se torna cada vez mais uma superfície não-Lambertiana, e a FDRB apresenta um aumento proeminente na reflectância na direção oposta de espalhamento, presumivelmente devido à reflectância especular;
- d) as FDTBs mostraram menor variabilidade com as alterações dos ângulos de incidência do que as FDRBs, e as distribuições para cada ângulo de incidência são similares em geometria e em magnitude.

Para uma melhor compreensão das características de reflexão da REM incidente sobre uma folha é necessário o conhecimento de sua composição química, principalmente qualidade e quantidade de pigmentos, e de sua morfologia interna (distribuição de tecidos, quantidade e distribuição e

quantidade de espaços celulares, etc.)

Uma folha típica é constituída por dois tecidos básicos, sendo o primeiro denominado epiderme, no qual desenvolve-se muitas vezes uma fina e relativamente impermeável superfície externa constituída por ceras e/ou outros polímeros. Abaixo da epiderme encontra-se o mesófilo fotossintético, o qual freqüentemente é dividido em uma ou mais camadas de células paliçádicas alongadas, arranjadas perpendicularmente à superfície da folha. Trata-se do parênquima paliçádico. Ainda no mesófilo estão os espaços intercelulares cheios de ar, cujo acesso para o meio externo é feito através dos estômatos. Esta rede de passagens de ar constitui a via de acesso na qual o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) alcança as células fotossintéticas e na qual o oxigênio ( $\text{O}_2$ ) liberado na fotossíntese retorna à atmosfera externa. Esta última estrutura mencionada se refere ao parênquima esponjoso. As disposições destes tecidos, bem como suas dimensões proporcionais são dependentes das espécies vegetais e das condições ambientais nas quais estes se desenvolvem.

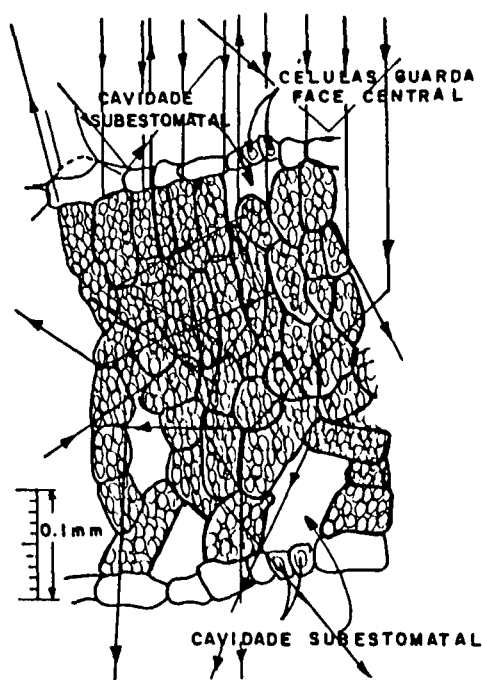
A Figura 2.5 ilustra os possíveis caminhos da REM incidente sobre uma folha.

Uma pequena quantidade de radiação é refletida pelas células da camada superficial, sendo que a maior parte dessa radiação é transmitida para o parênquima esponjoso, onde os raios incidem freqüentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência forem suficientemente grandes. Esta reflexão múltipla é essencialmente um processo aleatório no qual os raios mudam de direção dentro da folha.



Dado o grande número de paredes celulares, alguns raios são refletidos de volta para a fonte de radiação, enquanto outros são transmitidos através da folha.

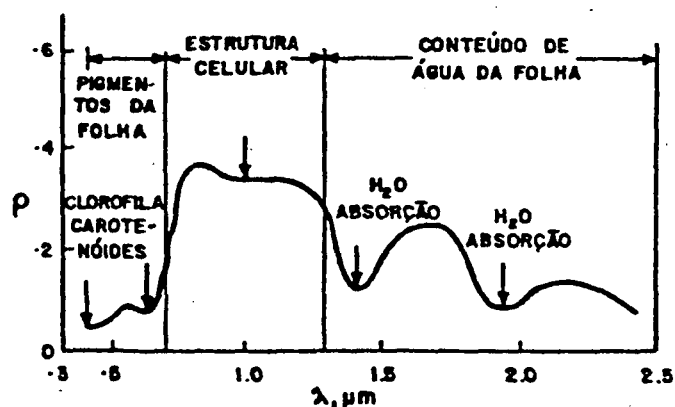
FIGURA 2.5 POSSÍVEIS TRAJETÓRIAS DA REM INCIDENTE SOBRE UMA FOLHA



Fonte: GATES et al. (1965)

Uma curva de reflectância típica de uma folha verde encontra-se apresentada na Figura 2.6. Os comprimentos de onda relativos ao ultra violeta não foram considerados porque uma grande parte dessa radiação é espalhada e/ou absorvida pela atmosfera, não sendo utilizada portanto pela vegetação.

FIGURA 2.6 CURVA TÍPICA DE REFLECTÂNCIA DE UMA FOLHA VERDE



Fonte: NOVO (1989)

A análise da Figura 2.6 permite verificar que a região do visível é marcada por baixa reflectância, relativamente às demais regiões espectrais. Esta baixa reflectância é decorrente de uma alta absorção da REM por parte dos pigmentos existentes nos cloroplastos, tais como clorofilas, carotenos e xantofilas. A radiação incidente é absorvida ou espalhada pela folha após interagir com sua estrutura. Os pigmentos absorvem então a REM de forma seletiva e parte dessa radiação é convertida em calor ou fluorescência e outra parte é convertida fotoquimicamente em energia que é estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese (KUMAR,1972).

Na região do infravermelho próximo, pode ser constatada uma pequena absorção e considerável espalhamento interno da REM na folha. GATES et al.(1965) mencionaram que a reflectância espectral das folhas nesta região é o resultado da interação da radiação incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água, por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo podendo, por sua vez, alterar a reflectância.

Na região do infravermelho médio, a absorção da água líquida predomina na resposta espectral das folhas. A reflectância em torno de  $2,0\mu\text{m}$  é geralmente pequena, sendo menor do que 10% para um ângulo de incidência de  $65^\circ$  e menor do que 5% para um ângulo de incidência de  $20^\circ$ , dada a forte absorção da água que ocorre na região compreendida entre  $1,3\mu\text{m}$  a  $2,0\mu\text{m}$ .

Esta forma típica da curva de reflectância de uma folha sadia apresenta variações em função de fatores genéticos (morfologia e composição química) e ambientais.

GAUSMAN et al. (1973) realizaram um trabalho no qual foram determinadas as propriedades espectrais (reflexão, transmissão e absorção) de folhas de 20 espécies agrícolas. Os autores analisaram o desvio padrão das reflectâncias destas folhas entre espécies, para regiões específicas do espectro eletromagnético. Para o comprimento de onda de  $0,55\mu\text{m}$ , foi constatada uma reflectância média de 13,3% e um desvio padrão de  $\pm 2,8\%$ . Para o comprimento de onda de  $1,0\mu\text{m}$ , esta reflectância média foi igual a 48,0%, com um desvio padrão igual a  $\pm 3,9\%$ .

Estes resultados indicaram que, para as 20 espécies estudadas, a amplitude relativa de variação entre os valores de reflectância de suas folhas foi maior para o comprimento de onda de  $1,0\mu\text{m}$ . Os autores atribuíram estes resultados à maior absorção da REM referente à região do visível, por parte dos pigmentos existentes nas folhas, uma vez que a maioria das espécies vegetais absorvem entre 80 a 90% da REM nesta região espectral.

Em termos absolutos, as variações entre as reflectâncias espectrais de folhas são muito menores na região do visível, quando comparadas com aquelas variações referentes à região do infravermelho, o que pode ser constatado pelos resultados alcançados por GAUSMAN et al. (1973).

Dentro da região do visível as maiores variações entre as reflectâncias espectrais de folhas de diferentes espécies devem ser esperadas na região do verde ( $0,52\mu\text{m}$  a  $0,60\mu\text{m}$ ), uma vez que elas apresentam diferenças entre si no conteúdo de pigmentos, especialmente clorofila (THOMAS et al., 1966).

### 2.2.3 Arquitetura do dossel

O fluxo solar incidente dentro do dossel em direção ao solo e depois em direção ao sensor não depende somente das propriedades de espalhamento e absorção dos elementos da vegetação, mas também de suas densidades e orientações espaciais. Um elemento da vegetação existente dentro do dossel recebe dois tipos de radiação: a radiação solar que não é interceptada por qualquer outro elemento e a radiação solar que é interceptada e então espalhada por vários elementos. Da mesma forma, o sensor recebe vários tipos de fluxos: um fluxo espalhado somente uma vez por um único elemento (espalhamento único), um fluxo espalhado várias vezes por muitos elementos (espalhamento múltiplo), mas que não atingiu o solo, e finalmente um fluxo refletido pelo solo que atinge o sensor sem ser interceptado por qualquer elemento da vegetação, ou se interceptado, é então espalhado na direção do sensor.

A distribuição da vegetação na superfície terrestre e a

densidade e orientação dos elementos da vegetação dentro do dossel constituem a chamada arquitetura do dossel (GOEL, 1988).

Considerando o plantio de culturas agrícolas, estas crescem a partir de sementes plantadas segundo determinada orientação no solo (fileiras, curvas de nível, etc). À medida que as plantas crescem, mais superfície do solo vai sendo coberta pela vegetação. Quando o dossel assume sua uniformidade, esta é costumeiramente caracterizada através do índice de Área Foliar (IAF), o qual é definido como a razão entre a área total de apenas uma face das folhas, por unidade de área de superfície do solo. Os métodos de determinação da área das folhas podem ser divididos em:

- a) métodos baseados no contorno da folha;
- b) métodos baseados na comparação de formas e tamanhos;
- c) métodos baseados em medidas lineares;
- d) métodos baseados em área e massas de folhas;
- e) métodos planimétricos;

DAUGHTRY e HOLLINGER(1984) consideram que o IAF é um parâmetro muito importante do dossel, sendo necessário em modelos de evapotranspiração e é relacionado também à produtividade de várias culturas agrícolas. Sua determinação manual ou através de equipamentos específicos é muito cara quando se deseja um razoável nível de exatidão.

Outro parâmetro importante na caracterização da arquitetura de um dossel é a Distribuição Angular de Folhas (DAF) que é definida por uma função densidade de distribuição  $f(\theta_1, \psi_1)$ , onde  $\theta_1$  e  $\psi_1$  são os ângulos de inclinação e azimutal

da folha, respectivamente. Por conseguinte, tem-se que  $f(\theta_1, \psi_1)d\theta_1 d\psi_1$  é a fração de área foliar com um ângulo de inclinação de  $\theta_1$  e  $\theta_1+d\theta_1$  e com um ângulo azimutal de  $\psi_1$  e  $\psi_1+d\psi_1$ . GOEL(1988) considera que em muitos modelos de reflectância da vegetação esta fração é assumida como sendo azimutalmente simétrica e que esta aproximação é aceitável para a maioria das tipologias vegetais.

A DAF varia muito para os diversos tipos de vegetação e considera-se como seis o número de tipos de DAFs usadas na descrição dos dosséis: planófila, erectófila, extremófila, plagiófila, uniforme e esférica. GOEL e STREBEL(1984) mostraram que todas estas distribuições ideais são casos especiais de uma distribuição universal denominada beta, com dois parâmetros ( $\mu$  e  $v$ ):

$$f(\theta_1) = [1/(360)(90)] [\Gamma(\mu+v)/\Gamma(\mu)\Gamma(v)] [1-\theta_1/90]^{\mu-1} [\theta_1/90]^{v-1} \quad (2.5)$$

Onde  $\Gamma$  representa a função Gama. Os dois parâmetros  $\mu$  e  $v$  são relacionados ao ângulo médio de inclinação da folha (AMIF) e seu segundo momento  $\langle \theta_1^2 \rangle$  através das seguintes equações:

$$AMIF = (90)v/(\mu+v) \quad (2.6)$$

$$\langle \theta_1^2 \rangle = (90)^2 v(v+1)/(\mu+v)(\mu+v+1) \quad (2.7)$$

A Tabela 2.1 apresenta as funções que descrevem estas distribuições acompanhadas dos valores médios, do segundo momento dos ângulos de inclinação das folhas e dos valores de  $\mu$  e  $v$ , que são coeficientes de espalhamento para fluxos difusos.

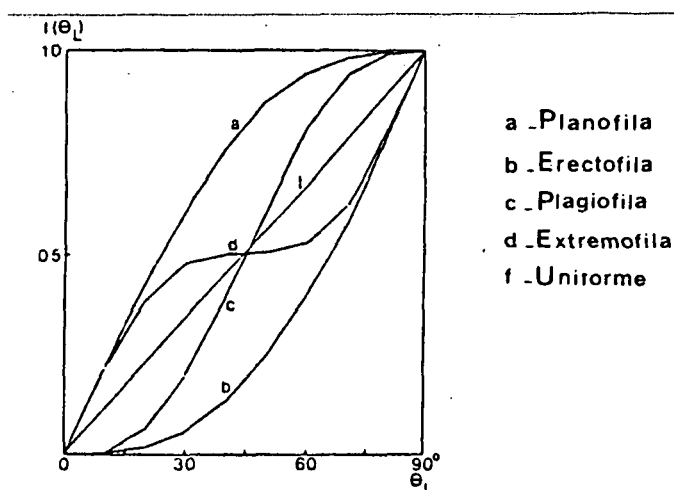
TABELA 2.1 DAFs QUE DESCREVEM SEIS TIPOS DE DOSSÉIS

Tipo	$f(\Theta_1)$	AMIF	$\langle \Theta_1^2 \rangle$	$\mu$	$\nu$
Planófila	$2(1+\cos 2 \Theta_1)/\pi$	26,76	1058,60	2,770	1,172
Erectófila	$2(1-\cos 2 \Theta_1)/\pi$	63,24	4341,40	1,172	2,770
Plagiófila	$2(1-\cos 4 \Theta_1)/\pi$	45,00	2289,65	3,326	3,326
Extremófila	$2(1+\cos 4 \Theta_1)/\pi$	45,00	3110,35	0,433	0,433
Uniforme	$2/\pi$	45,00	2700,00	1,000	1,000
Esférica	$\sin \Theta_1$	57,30	3747,63	1,101	1,930

Fonte: GOEL e STREBEL(1984)

BUNNIK(1978) apresentou a representação gráfica da função  $f(\Theta_1)$  para cada um dos tipos de DAFs descritas na Tabela 2.1, a qual encontra-se apresentada na Figura 2.7.

FIGURA 2.7 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS TIPOS DE DAFs



Fonte: BUNNIK(1978)

Os efeitos do IAF e da DAF sobre a reflectância do dossel podem ser analisados qualitativamente. Na região do visível, uma vez que grande quantidade de radiação incidente é absorvida com o aumento do número de folhas, isto é, com o aumento do IAF, mais e mais REM incidente passa a ser absorvida pela vegetação. KUMAR (1972) mencionou que em termos médios quando o IAF atinge valores próximos a 2 ou 3, muita radiação é interceptada e absorvida pelas folhas e sucessivos aumentos nos valores do IAF, acima dos níveis mencionados, não acarretam alterações na reflectância do dossel. Por conseguinte, nesta região espectral, a reflectância do dossel decresce quase que exponencialmente com o aumento do IAF, quando este se apresenta entre 0 e 3. Na região do infravermelho, onde a absorção é mínima, o aumento do IAF implica no aumento do espalhamento do fluxo e conseqüentemente, no aumento da reflectância do dossel, aqui também quase que exponencialmente, até que, em termos também médios, o IAF atinja valores compreendidos entre 6 e 8 (KUMAR, 1972).

TUCKER (1977) estudou o que chamou de natureza assintótica da reflectância espectral de gramíneas. O termo "natureza assintótica" refere-se a não alteração dos valores da reflectância espectral com a alteração do IAF de um determinado dossel, e é representada pelos valores de IAF acima dos quais não são detectadas alterações nos valores da reflectância. Estes valores de IAF são também denominados de "pontos de saturação".



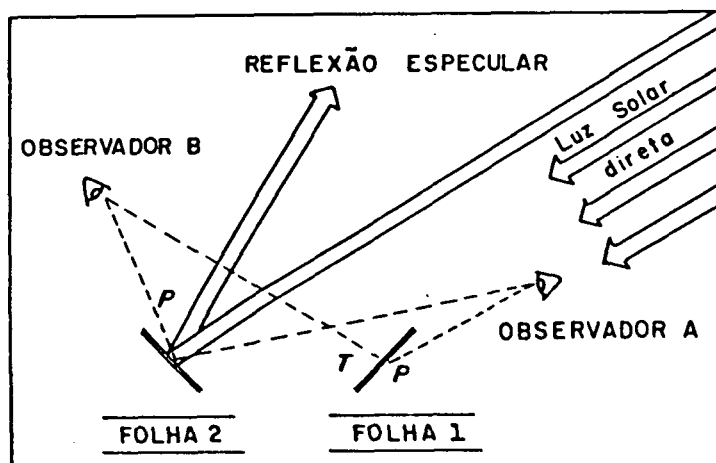
O autor concluiu que, para as condições de realização de seu trabalho, o ponto de saturação para a região do vermelho ( $0,63\mu\text{m}$  a  $0,69\mu\text{m}$ ) foi de duas a três vezes menor do que aquele determinado para a região do infravermelho próximo ( $0,74\mu\text{m}$  a  $1,10\mu\text{m}$ ), o que confirmou as afirmações de KUMAR (1972).

WANJURA e HATFIELD (1988) estudaram as características vegetativas e espectrais de quatro tipos de dosséis (algodão, soja, sorgo e girassol). Os resultados apontaram para pontos de saturação de IAF  $\geq 3,0$ , para a região do vermelho, em todos os dosséis, e para este mesmo valor na região do infravermelho próximo, para os dosséis de algodão e girassol e IAF  $\geq 6,0$  para soja e sorgo.

CURRAN e WARDLEY (1988) consideraram que a Distribuição Angular de Folhas (DAF) é um dos mais importantes parâmetros, sob o ponto de vista da interação da REM com a vegetação, uma vez que pequenas alterações na orientação espacial das folhas pode resultar em grandes alterações tanto na composição espectral (KNIPLING, 1970 e COLWELL, 1974), quanto na magnitude da reflectância espectral de um dossel (WARDLEY et al., 1987). Apesar disso, KIMES e KIRCHNER (1983) e LORD et al. (1985) mencionaram que os aspectos geométricos do dossel são tão complexos, heterogêneos e mutáveis que suas determinações, apesar de muito desejáveis, são muito difíceis de serem realizadas.

NORMAN et al. (1985) apresentaram um exemplo bastante didático sobre o efeito da DAF sobre a FDRB, no qual são consideradas duas folhas planas localizadas no plano principal, assim como mostrado na Figura 2.8.

FIGURA 2.8 GEOMETRIA DO DOSSEL INFLUENCIANDO EM SUA REFLECTÂNCIA



Fonte: NORMAN et al.(1985)

A folha 2, a qual encontra-se posicionada quase que perpendicularmente à iluminação do Sol, é bem iluminada, enquanto que a folha 1, que encontra-se posicionada praticamente paralelamente aos raios solares é fracamente iluminada. O observador A, que tem o Sol praticamente às suas costas, observará as folhas bem iluminadas em destaque, em detrimento das folhas fracamente iluminadas. Para este observador portanto, a cena observada aparecerá clara, com esta claridade sendo influenciada pelas reflectâncias da face dorsal da folha 1 e da face ventral da folha 2. Já o observador B observará melhor a folha 1, fracamente iluminada, e um pouco da folha 2, bem iluminada. Para este observador a cena aparecerá mais escura. Neste caso o brilho da cena será determinado pela transmitância da folha 1 e pela reflectância da folha 2.

Quando o Sol encontra-se posicionado imediatamente atrás do observador (ou sensor) uma grande proporção de componentes do dossel diretamente iluminados são observados. Sombras no interior do dossel ou sobre a superfície do solo ficarão ocultas pela folhagem que encontra-se iluminada pelo Sol. Neste caso, a reflectância do dossel tende a ser elevada, constituindo um pico denominado corriqueiramente de "hot-spot" (SUITS, 1972).

Um dossel é constituído por muitas folhas dotadas de diferentes ângulos de inclinação e ângulos azimutais, por isso a magnitude do efeito "hot-spot" em geral depende da DAF. Uma vez que o sombreamento de uma folha sobre a outra é dependente de seus tamanhos, este efeito é também dependente destes mesmos tamanhos.

Outro efeito da DAF sobre a reflectância de um dossel é sua influência na probabilidade de ocorrência de lacunas através do dossel levando em conta os ângulos zenital solar e o de visada, os quais determinam se os fluxos de incidência e de reflexão serão ou não interceptados pela vegetação. Pelo exposto fica claro concluir que a FDRB é fortemente dependente da DAF.

KIMES(1984) apresentou uma excelente discussão sobre as relações entre a DAF e a FDRB. Segundo este autor, dosséis constituídos por folhas posicionadas próximas à horizontal apresentam uma variação menor na reflectância como uma função dos ângulos de incidência e de visada, mas apresentam as reflectâncias mais altas de todas as demais distribuições. Para dosséis com folhas mais eretas, a reflectância decresce

com o aumento do ângulo zenital solar na região do visível, enquanto que esta aumenta na região do infravermelho, uma vez que o sensor passa a "ver" mais o espalhamento causado pelos elementos do dossel localizados nas camadas superiores e "vê" menos os componentes das camadas inferiores que espalham menos a REM.

PINTER et al. (1985) mediram as reflectâncias espectrais de seis cultivares de trigo, sob diferentes ângulos de iluminação. Os resultados alcançados reforçaram a conclusão de que os dosséis planófilos apresentam menores variações na sua reflectância sob diferentes condições geométricas de iluminação do que os erectófilos.

JACKSON et al. (1979) estudaram o efeito da configuração de plantas de trigo, elevação solar e ângulo azimutal na sua reflectância espectral. Na região do visível, as alterações na reflectância foram explicadas pela maior absorção da REM por parte dos pigmentos. Em dosséis menos densos, as plantas absorvem muito a REM nesta região espectral, e sombreiam diferentes porções do solo e de outras partes de plantas vizinhas, dependendo da elevação solar, direção de fileiras e alturas de plantas. Os autores consideraram que para uma orientação norte-sul de fileiras, o solo é sombreado intensamente nas primeiras horas da manhã, mas próximo ao horário das 12:00h, ele torna-se quase que inteiramente iluminado. Por conseguinte, a reflectância aumenta na região do visível com a elevação solar. Para uma orientação leste-oeste de fileiras, a fração iluminada do solo é menos alterada com a elevação solar, em relação a orientação

norte-sul, dependendo do espaçamento entre fileiras e da altura das plantas.

Estes mesmos autores mencionaram ainda que para a região do infravermelho, em condições de baixa elevação solar, quando um determinado dossel não é disposto em fileiras e a iluminação se dá mais oblíqua em relação a camada superior do dossel (menor elevação solar), a REM entra no dossel de forma que numerosas folhas passam a ser iluminadas, acarretando o aumento da reflectância nesta região espectral. Quando o Sol posiciona-se mais próximo ao zênite (maxima elevação), o número de folhas diretamente encontradas pela REM diminui e em consequência disso, a reflectância do dossel tende também a diminuir.

A orientação em fileiras exerce menos influência na região do infravermelho do que na região do visível devido ao menor efeito das sombras, uma vez que as folhas são praticamente transparentes nesta região espectral.

Com relação à geometria de visada, esta tem sido estudada principalmente no que se refere às variações do ângulo zenital de visada ( $\theta_v$ ). Seu efeito foi apresentado por KRIEBEL (1978) onde seu aumento acarretou também aumentos na reflectância medida de quatro diferentes tipos de vegetação, tanto na região do visível quanto do infravermelho.

RANSON et al. (1986) avaliaram o efeito dos ângulos solar e de visada e da camada inferior ("background") de dosséis de *Abies balsamea* sobre suas reflectâncias espectrais. Os autores consideraram três densidades de dosséis, sendo um muito, outro médio e outro pouco densos, e três tipos

diferentes de revestimento para suas camadas inferiores, sendo uma constituída por grama, a outra por placas de um material de tonalidade clara e outra do mesmo material, mas de tonalidade escura. Os resultados encontrados por estes autores levaram-os à concluir sobre a complexidade de interpretar a resposta espectral de cenas tão heterogêneas, contudo, uma vez que esta reposta foi considerada como o efeito composto da vegetação e da camada inferior do dossel, sendo cada um de seus componentes iluminados e/ou sombreados, as suas tendências tornaram-se aparentes.

Dosséis mais homogêneos, com grande quantidade de folhas verdes, foram altamente reflectivos na região do infravermelho, mas refletiram muito pouco na região do vermelho. Para dosséis menos densos, o efeito da camada inferior do dossel e das sombras teve de ser considerado na análise dos resultados.

Como exemplo destas afirmações, estes mesmos autores apresentaram alguns de seus resultados referentes à variação da diferença normalizada ( $\text{reflectância no infravermelho} - \text{reflectância no vermelho} / \text{reflectância no infravermelho} + \text{reflectância no vermelho}$ ), com a variação do ângulo zenital solar, considerando a visada vertical do sensor (visada à nadir). As diferenças normalizadas, tanto para dosséis densos quanto para dosséis pouco densos, foram superiores daquelas determinadas para dosséis com grama na camada inferior. Isto deveu-se às reflectâncias similares, em ambas as regiões espectrais, entre a grama e as árvores de *Abies balsamea* utilizadas em seus experimentos.

O aumento na diferença normalizada com o aumento do zênite solar, deu-se devido às diferenças no espalhamento da REM pelo dossel e pelas diferentes camadas inferiores. Quando o Sol posicionou-se mais elevado (menor  $\theta_s$ ), o sensor, que encontrava-se visando verticalmente o dossel, recebeu predominantemente a REM refletida de áreas diretamente iluminadas pelo Sol. Com o aumento de  $\theta_s$ , a probabilidade de interceptação da REM incidente, por parte das folhas das árvores, também aumentou. Uma vez que a transmitância das folhas verdes, na região do infravermelho próximo, foi maior do que na região do vermelho, a reflectância nesta última região decresceu numa taxa maior do que na região do infravermelho. Por conseguinte, as porções sombreadas da cena observada apresentaram uma maior diferença normalizada do que as áreas iluminadas.

No dossel composto pelas árvores e placas claras ocupando a camada inferior, os efeitos das sombras sobre a diferença normalizada tornaram-se mais evidentes. Em situações de iluminação mais vertical (menor  $\theta_s$ ), as contribuições das placas claras diretamente iluminadas sobre a reflectância do dossel foram maiores e os valores da diferença normalizada foram mínimos, tanto para dosséis densos quanto para os menos densos. Com o aumento de  $\theta_s$ , aumentaram também as sombras no interior do dossel, e as porções das placas diretamente iluminadas diminuíram, o que acarretou a diminuição da contribuição da camada inferior do dossel. Contudo, a diferença absoluta entre as reflectâncias no vermelho e infravermelho próximo, aumentou e a diferença normalizada

também aumentou. Isto foi mais evidente para dosséis pouco densos, em cuja camada inferior estavam dispostas as placas claras.

Estes resultados concordaram com aqueles alcançados por PINTER et al. (1983), quando estudaram a dependência entre a reflectância espectral de dosséis de culturas agrícolas e a geometria de iluminação.

RANSON et al. (1981) estudaram a reflectância espectral de dosséis densos e esparsos de soja. Os autores verificaram que quando o sensor "observava" o dossel no mesmo plano de iluminação, a reflectância do dossel aumentava na direção de retroespalhamento e diminuía na direção oposta em ambas as regiões espectrais (visível e infravermelho).

Estes mesmos autores constataram ainda que com o aumento do ângulo  $\theta_v$ , a reflectância do dossel diminuiu quando a iluminação se deu em um plano perpendicular ao plano de visada.

RANSON et al. (1986) ainda consideraram que geralmente os altos valores da diferença normalizada para medidas realizadas em visadas oblíquas foram devidos ao fato de que o sensor "viu" mais as copas das árvores do que a camada inferior do dossel. Quando a visada deu-se de frente para o Sol, uma grande proporção da cena observada foi sombreada e a diferença normalizada foi mais alta. Os autores ressaltaram que quando  $\theta_s$  foi maior, a diferença normalizada diminuiu. A causa mais provável para este resultado foi o aumento na proporção da irradiância na região do vermelho na distribuição espectral da REM incidente em situações quando  $\theta_s$  torna-se



muito grande.

Na direção do retroespalhamento ("hot spot"), a proporção de sombras foi reduzida e o sensor "viu" principalmente as folhas e ramos diretamente iluminados, além da camada inferior. Nesta condição, houve uma diminuição da diferença normalizada.

GOEL (1988) considerou que quando os elementos da vegetação não se encontram uniformemente distribuídos, pode-se constatar outro efeito da arquitetura do dossel sobre a FDRB. Supondo que ao invés de estarem uniformemente distribuídas no dossel, as folhas estivessem agrupadas. Este agrupamento apresentaria dois efeitos principais: ele aumentaria a probabilidade de ocorrência de lacunas através de toda a extensão do dossel, que por sua vez aumentaria a influência do espalhamento dos elementos deste dossel localizados nas camadas mais próximas ao solo, e ainda ele aumentaria o número de agrupamentos que apresentam baixas transmissividades. Ambos estes efeitos tenderiam a aumentar o retroespalhamento em detrimento daquele espalhamento descendente.

#### 2.2.4 Espalhamento da REM pelo solo

Assim como os elementos da vegetação, o solo também absorve e espalha (reflete) a REM incidente sobre ele. Parte da radiação refletida é especular e parte é difusa. A FDRB para os solos argilosos é usualmente não-Lambertiana e pode ser mais não-Lambertiana do que as FDRBs de muitos tipos de coberturas vegetais (EATON e DIRMHIRM, 1979).

Quanto maior for a rugosidade da superfície de um solo, mais não-Lambertiana será a FDRB. Contudo, em muitos modelos de reflectância da vegetação, o solo é assumido como um refletor difuso puramente Lambertiano, caracterizado pela sua reflectância hemisférica  $\rho_s$ . Esta aproximação pode parecer inócuo quando o IAF assume valores maiores do que 3 e conseqüentemente pouca radiação atinge o solo. Contudo, no caso de dosséis esparsos, a reflectância do solo atinge uma importância maior, especialmente em situações de visadas verticais e na direção do retroespalhamento. Em geral o efeito do espalhamento múltiplo nas camadas mais próximas ao solo acarreta mais absorção, diminuindo a reflectância do dossel.

RAO et al. (1979) realizaram um trabalho envolvendo a reflectância bidirecional de dosséis de cereais, grama e milho. Os autores concluíram que a radiância da cena, que foi efetivamente coletada por um sensor, foi representativa das influências das plantas e do solo. Neste contexto o IAF e o tipo de solo assumem uma importância significativa na reflectância do dossel. Os autores ressaltaram ainda que para conhecer a contribuição do solo, as observações devem ser feitas repetidas vezes, tendo conhecidas a porcentagem de cobertura do solo ou IAF e a geometria de visada. A sombra foi considerada por estes autores como um elemento que introduziu discrepâncias nos resultados, normalmente acarretando diminuição na radiância refletida. De maneira geral, quanto mais exposto for o solo, maiores foram os valores de reflectância medidos na região do visível.

### 2.3 MODELOS DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO

Os modelos de reflectância da vegetação têm sido propostos segundo as mais diferentes abordagens, para o atendimento de diferentes finalidades.

GOEL(1988) apresentou quatro categorias distintas para os modelos em questão:

**Modelos geométricos:** nesta categoria o dossel é considerado como sendo constituído por uma superfície com propriedades reflectivas conhecidas, com objetos geométricos com formas e dimensões (cilindros, cones, esferas, elipsóides, etc) e propriedades óticas (reflectância, transmitância e absorptância) pré-estabelecidas. A interceptação da REM, o sombreamento destes objetos e a reflectância da superfície basal são analisados na determinação da reflectância de todo o dossel. Estes modelos representam bem dosséis esparsos (arbustos, plantios em estágios iniciais de desenvolvimento, etc) nos quais o espalhamento múltiplo é desprezível e em condições de baixo ângulo zenital solar, onde o sombreamento mútuo dos objetos pode ser igualmente desprezível;

**Modelos de meio turbido:** aqui os elementos da vegetação são tratados como pequenas partículas que absorvem e espalham radiação que ainda se distribuem aleatoriamente nas camadas horizontais do dossel, com orientações espaciais específicas. O dossel é então tratado como um meio horizontalmente uniforme, no qual a trajetória da radiação depende somente de sua espessura e não de sua extensão horizontal. A arquitetura do dossel é caracterizada pelo IAF e DAF, sendo desprezadas as dimensões das folhas, suas distâncias relativas, etc.

GOEL(1988) menciona que estes modelos alcançam bons resultados para dosséis densos e uniformes nos quais os elementos da vegetação são bem menores do que a espessura do dossel;

**Modelos híbridos:** nestes modelos há uma conjugação entre os dois tipos de modelos discutidos anteriormente, ou seja, o dossel passa a ser considerado como constituído por elementos com formas geométricas que igualmente absorvem e espalham radiação, contudo, nestes, o espalhamento múltiplo não é desprezado. Estes modelos são especialmente úteis em casos de dosséis esparsos;

**Modelos de simulação:** o arranjo e orientação dos elementos da vegetação são simulados num computador e cada um destes elementos é dividido num número finito de áreas. Através de um sorteio de números aleatórios, é determinado se um dado feixe de radiação atinge ou não cada uma destas áreas. Caso atinja, a direção da radiação espalhada é estimada através de um novo sorteio. Assim a interceptação e o espalhamento da radiação são numericamente estimados quase que fóton a fóton. Estes modelos empregam muito tempo de computação, mas apresentam a vantagem de permitir uma simulação mais realista do regime de radiação no interior do dossel.

Todos os modelos que determinam o regime de radiação no interior do dossel podem ser fundamentados em geometria ótica, teoria da transferência radiativa ou na teoria da transmitância média do dossel. A seguir serão apresentados alguns aspectos relacionados aos modelos de meio turbido dos quais faz parte o modelo de reflectância da vegetação

considerado neste trabalho.

### 2.3.1 Modelos de meio turbido para dosséis homogêneos

Nestes modelos o dossel é considerado como um meio plano e paralelo, infinitamente extenso que pode ser subdividido em camadas distintas (uma ou mais), caracterizadas por propriedades óticas e estruturais específicas e constantes horizontalmente. Em cada uma destas camadas, os elementos da vegetação são tratados como pequenas partículas que absorvem e espalham radiação e que possuem propriedades geométricas e óticas específicas.

Alguns destes modelos se valem da teoria da transmitância média do dossel, outros usam a teoria da transferência radiativa e outros, de uma combinação entre ambas as teorias. Assim, GOEL(1988) considera que estes modelos podem ser divididos em três categorias;

- a) modelos baseados na teoria Kubelka-Munk (KM): estes utilizam uma solução à equação da transferência radiativa proposta por KUBELKA e MUNK(1931), apud GOEL(1988);
- b) modelos discretos: nestes modelos o dossel é representado por um número finito de camadas e equações algébricas são usadas para a obtenção dos fluxos ascendentes e descendentes no topo de cada camada;
- c) modelos baseados na equação de transferência radiativa: aqui são feitas algumas pressuposições sobre as relações entre a distância ótica, a função

fase de espalhamento e os parâmetros arquitetônicos do dossel (IAF e DAF), fundamentando-se para tanto na teoria de transferência radiativa, diferenciando-se dos modelos da primeira categoria na solução das equações pertinentes.

O modelo considerado neste trabalho é fundamentado na solução da equação da transferência radiativa proposta por KUBELKA e MUNK (1931), apud GOEL(1988). Assim, faz-se mister a apresentação dos principais aspectos relacionados a esta teoria.

#### 2.3.1.1 Teoria da Transferência Radiativa

GOEL(1988) apresenta a seguinte equação integro-diferencial para a radiação não polarizada como o cerne desta teoria, a qual é dada por:

$$\delta I(\omega; s)/\delta \omega = -I(\omega; s) + (1/4\pi) \int p(s, s') I(\omega; s') dw' + \varepsilon(r, s)/\sigma_p \quad (2.8)$$

onde:  $I$  é a intensidade específica (também chamada radiância ou brilho) na posição  $r$  na direção  $s$ ;

$p$  é o número de partículas por unidade de volume com as quais a radiação incidente interage;

$\sigma$  é a soma das seções transversais de espalhamento e absorção de uma partícula média;

$dw'$  é um elemento de um ângulo sólido e a integração em  $w'$  é feita para incluir as contribuições para todas as direções  $s'$ ;

$\omega$  é a distância ótica definida por:

$$\omega = \int \sigma p \, ds \quad (2.9)$$

A função  $p(s,s')$  é também conhecida como Função Fase, que é a probabilidade que a radiância na direção  $s'$  será espalhada num ângulo sólido na direção  $s$ . O parâmetro  $\epsilon$  é a emissão de um dossel. No caso da vegetação,  $\epsilon(r,s)=0$ .

A solução da equação (2.8) envolve dois passos:

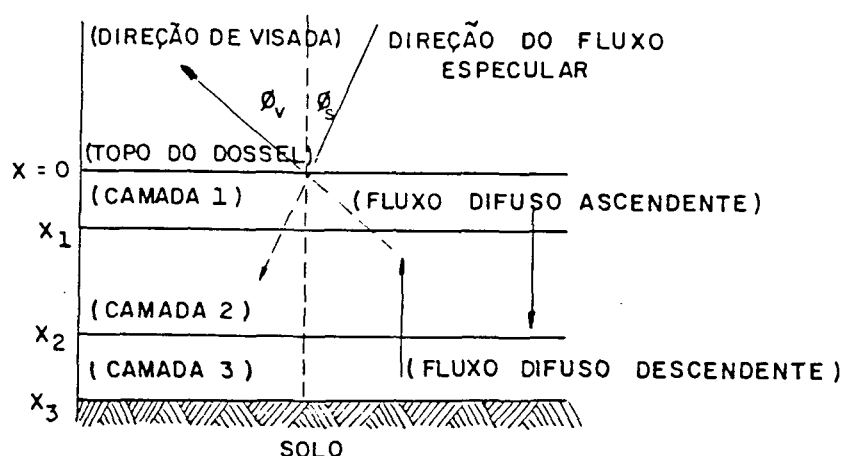
1. Cálculo ou especificação da Função Fase em termos das propriedades do dossel: para qualquer aplicação, esta é uma tarefa difícil. Para a vegetação ela é ainda mais difícil, uma vez que o dossel é em geral extremamente heterogêneo e complexo, não podendo ser tratado como um meio regular e completamente aleatório. Ainda os elementos de espalhamento e absorção da vegetação são muito grandes quando comparados com as moléculas e aerossóis do ar, e são caracterizados por um coeficiente relativamente alto, cerca de 0,85 para a radiação fotossinteticamente ativa (visível) e cerca de 0,05 a 0,15 para a radiação referente ao infravermelho próximo.

2. Solução da equação para uma dada Função Fase e condição de contorno: é escolhido arbitrariamente um valor para  $I$  localizado do lado direito da equação, a qual passa então a ser integrada segundo condições de contorno impostas. Como resultado é determinado um novo valor para  $I$ , que será usado como o próximo valor para uma nova integração da equação. O procedimento se repete até que não sejam detectadas alterações significativas nos valores de  $I$ . Essa significância define a precisão desejada nas estimativas mencionadas. Para a vegetação, o limite superior do dossel é exposto tanto à radiação direta quanto à difusa, o que torna difícil o cálculo quando se considera este limite como a condição de contorno em

questão.

Para dosséis com uma distribuição homogênea da vegetação estes podem ser aproximadamente considerados como um meio plano- paralelo infinitamente extenso, o qual pode ser dividido em camadas com propriedades estruturais e óticas constantes. A Figura 2.9 ilustra esquematicamente a aproximação mencionada.

FIGURA 2.9 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM DOSSEL COMO UM MEIO DE PROPAGAÇÃO DA REM



Fonte: GOEL(1988)

Neste caso a intensidade específica  $I$  da equação (2.8) é uma função somente de uma direção  $z$ , perpendicular às camadas, e dos ângulos  $\theta_v$  e  $\psi_v$ . Assim a equação (2.8) fica:

$$\mu \delta I(\omega; \mu, \psi) / \delta \omega = I(\omega; \mu, \psi) - K(\omega; \mu, \psi) \quad (2.10)$$

onde:

$$K = (a/4\pi) \int_0^{2\pi} d\psi' \int_{-1}^{+1} d\mu' p(\mu, \psi; \mu', \psi') I(\omega; \mu', \psi') \quad (2.11)$$

$$\mu = \cos \theta$$

$$d\omega = \sigma p \, dz$$



Aqui  $\omega$  é a distância ótica na direção  $z$ ,  $a$  é o albedo para o espalhamento único, isto é:

$$a=s/(\alpha+s) \quad (2.12)$$

$$\sigma_p=(\alpha+s) \quad (2.13)$$

Onde  $s$  é o coeficiente de espalhamento e  $\alpha$  é o coeficiente de absorção.

Integrando-se formalmente a equação (2.10), tem-se:

$$I(\omega; \pm\mu, \psi) = I(\omega_V; \pm\mu, \psi) \exp(-(\omega - \omega_V)/\mu) + (1/\mu) \int_{\tau_V}^{\tau} K(\omega'; \pm\mu, \psi) \exp(-(\omega - \omega')/\mu) d\omega' \quad (2.14)$$

Basicamente esta equação diz que a radiância (ascendente ou descendente) na trajetória ótica  $\omega$  é o resultado da radiância atenuada (ascendente ou descendente) a  $\omega_V$ , mais aquele feixe espalhado ao longo da trajetória entre  $\omega$  e  $\omega_V$ . Considerando separadamente a radiação difusa (radiância  $Id(\omega; \mu, \psi)$ ) e o feixe solar diretamente transmitido, tem-se:

$$I(\omega; \mu, \psi) = Id(\omega; \mu, \psi) + \delta(\mu - \mu_S) \delta(\psi - \psi_S) \pi F \exp(\omega/\mu_S) \quad (2.15)$$

onde:  $\mu_S = \cos \theta_S$ ;

$\theta_S$  e  $\psi_S$  = zênite e azimuth solar;

$\pi F$  = densidade de fluxo solar na direção  $(\theta_S, \psi_S)$ .

Substituindo, portanto, a equação (2.15) na equação (2.10), tem-se:

$$\mu \delta Id(\omega; \mu, \psi) / \delta \omega = Id(\omega; \mu, \psi) - (a/4) p(\mu, \psi; \mu_S, \psi_S) F \exp(\omega/\mu_S) - (a/4\pi) \int_0^{2\pi} d\psi' \int_{-1}^1 p(\mu, \psi; \mu', \psi') Id(\omega; \mu', \psi') d\mu' \quad (2.16)$$

Os valores de reflectância do dossel são dados por:

$$R(\lambda) = I_{\lambda}(\theta_V, \psi_V) / I'_{\lambda}(\theta_V, \psi_V) \quad (2.17)$$

Onde  $\theta_V$  e  $\psi_V$  caracterizam a direção de visada;  $I$  é a radiância refletida do dossel;  $I'$  é a radiância refletida de um corpo perfeitamente lambertiano em condições similares de iluminação, e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Mesmo para a condição geométrica mais simples, não existe uma solução trivial para uma Função Fase representada pela equação (2.16). Vários modelos de reflectância de dosséis usam aproximações ou encontram soluções numericamente. Uma alternativa para a solução numérica da equação (2.8) é a aproximação KM de quatro fluxos para um meio plano-paralelo. Nela o fluxo difuso é descrito em termos de dois fluxos monocromáticos  $E_-$  e  $E_+$ , trafegando descendentemente ou ascendentemente, respectivamente e perpendicularmente ao plano ilustrado na Figura 2.9. As variações destes fluxos são descritas por meio de parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma$ , os quais são coeficientes de absorção e espalhamento, respectivamente. Estes parâmetros são assumidos como sendo os mesmos para ambos os fluxos. A variação de um fluxo colimado é descrita por três parâmetros:  $k$ , o coeficiente de absorção,  $S_1$  e  $S_2$ , os coeficientes de espalhamento para o feixe colimado num fluxo difuso na mesma direção e na direção oposta, respectivamente. A equação de transferência radiativa fica então aproximada através das seguintes equações:

$$dE_-/d(-\omega) = -(\alpha + \gamma)E_- + \gamma E_+ + S_1 F_- + S_2 F_+ \quad (2.18)$$

$$dE_+/d(\omega) = -(\alpha + \gamma)E_+ + \gamma E_- + S_1 F_+ + S_2 F_- \quad (2.19)$$

$$dF_-/d(-\omega) = -(k + S_1 + S_2)F_- \quad (2.20)$$

$$dF_+/d(\omega) = -(k + S_1 + S_2)F_+ \quad (2.21)$$

Os dois primeiros termos do lado direito da equação (2.18) demonstram que o fluxo difuso descendente decresce devido à sua absorção e espalhamento, enquanto aumenta devido ao espalhamento do fluxo ascendente. Os terceiro e quarto termos representam o aumento do fluxo descendente devido à conversão do fluxo colimado num fluxo difuso. Os demais termos das demais equações têm interpretações físicas semelhantes. Os fluxos  $E_-$  e  $E_+$  são relacionados com a intensidade específica  $I$  através das equações:

$$E_+ = \int_0^{2\pi} d\psi_S \int_0^{\pi/2} d\theta_S I(\omega; +\mu, \psi_S) \mu \sin \theta_S \quad (2.22)$$

$$E_- = \int_0^{2\pi} d\psi_S \int_0^{\pi/2} d\theta_S I(\omega; -\mu, \psi_S) \mu \sin \theta_S \quad (2.23)$$

Estes dois fluxos quando no topo do meio plano-paralelo são conhecidos como irradiância ou emitância radiante, respectivamente. Nota-se que a irradiância é a densidade de fluxo numa superfície horizontal; por conseguinte, na teoria KM, essencialmente inicia-se pela integração da equação de transferência radiativa sobre  $\mu$  e  $\psi$ , e então resolve-se para fluxos integrados.

Assumindo que o fluxo colimado existe somente no sentido descendente, ou seja,  $F_+ = 0$ , a teoria de três fluxos é conhecida como Teoria Duntley (DUNTLEY, 1942; apud GOEL, 1988) e envolve cinco parâmetros. Se o fluxo colimado é totalmente ausente, então trata-se de dois fluxos, ou teoria KM de dois parâmetros.

As equações (2.18), (2.19), (2.20) e (2.21) são diferenciais lineares, por isso operações matemáticas simples

são suficientes para calcular o fluxo em qualquer ponto do meio em questão.

Fazem-se as seguintes observações sobre o uso da Teoria KM para modelar a reflectância de dosséis:

1. a reflectância hemisférica do dossel pode ser calculada para formar a razão do fluxo direto ascendente com o fluxo direto descendente (especular e difuso) no topo do dossel. Desde que o fluxo difuso dentro do dossel é assumido isotrópico, a reflectância do dossel é assumida Lambertiana (a intensidade específica  $I(r,s)$  é independente da direção  $s$ ). Para este caso, a equação (2.22) fica:

$$E_+ = I(\omega) 2\pi [\cos^2 \theta/2]_{\pi/2}^0 = \pi I(\omega) \quad (2.24)$$

Como pode ser observado na equação (2.24), a razão entre a irradiância e a intensidade específica fica igual a  $\pi$ . Ou seja:

$$\pi = E_+ / I(\omega) \quad (2.25)$$

2. a variável  $\omega$  pode representar outra variável do dossel do que a espessura ótica desde que esta seja proporcional a esta espessura, assim como o IAF acumulado até o topo do dossel;

3. se vários coeficientes de espalhamento e absorção forem assumidos independentes das direções de iluminação e de visada, o cálculo da reflectância será independente da mesma forma.

Como mencionado anteriormente, o modelo de reflectância da vegetação considerado neste trabalho é baseado na teoria KM

já apresentada resumidamente. Antes de apresentar a descrição deste modelo, faz-se necessária ainda a apresentação dos fundamentos básicos de outro modelo do qual este foi derivado. Trata-se do modelo proposto por SUITS (1972), que leva o nome de seu proponente.

### 2.3.2 O modelo Suits

De todos os modelos de reflectância da vegetação baseados na solução proposta pela teoria KM, o modelo Suits é o único que considera a reflectância de um dossel como dependente da geometria de iluminação e dos parâmetros arquitetônicos e espectrais de seus elementos constituintes. Neste modelo, o dossel é idealizado como uma mistura de painéis refletores e transmissores Lambertianos, tanto no sentido vertical quanto no horizontal, e estes painéis, que em realidade representam os próprios elementos da vegetação, são substituídos por suas projeções (horizontal e vertical), segundo o esquema apresentado na Figura 2.10. Segundo VERHOEF (1984), esta simplificação geométrica é possível graças à expressão dos parâmetros da teoria KM através dos seguintes parâmetros:

$\sigma_h$  = área média da projeção de um elemento da vegetação (no caso da Figura 2.10, uma folha) no plano horizontal;

$\sigma_v$  = área média do elemento (folha) quando projetado em dois planos ortogonais verticais;

$n_h$  = número de projeções horizontais por unidade de volume;

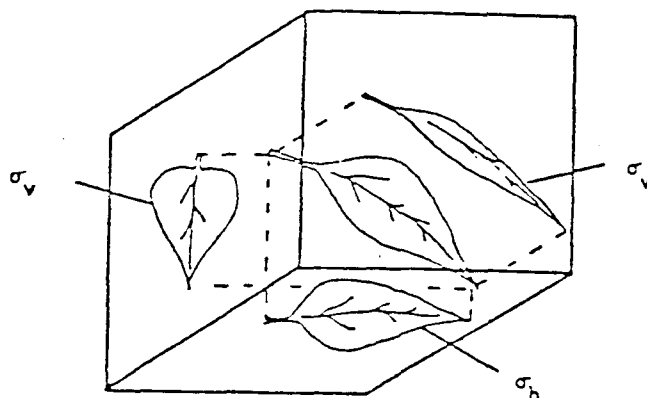
$n_v$  = número de projeções verticais por unidade de volume;

$\rho$  = reflectância hemisférica do elemento;

$\tau$  = transmitância hemisférica do elemento;

$\theta_s$  = ângulo zenital solar.

FIGURA 2.10 SIMPLIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO SUITS



Fonte: GOEL(1988)

Os parâmetros  $nh$ ,  $nv$ ,  $\sigma_h$  e  $\sigma_v$ , juntamente com a altura  $h$  (espessura) do dossel, estão relacionados ao IAF. Segundo BUNNIK (1978):

$$IAF = (h/S) (H' + V') \quad (2.26)$$

$$\text{onde: } H' = nh \sigma_h \quad (2.27)$$

$$V' = nv \sigma_v \quad (2.28)$$

$S$  = fator de correção que varia de acordo com a DAF e está compreendido entre 0,84 a 0,95.  $H'$  e  $V'$  também são relacionados com o Ângulo de Inclinação Médio das Folhas (AMIF):

$$AMIF = \text{Arctan}(V'/H') \quad (2.29)$$

As relações entre os parâmetros da teoria KM e os parâmetros anteriores estão apresentadas na Tabela 2.2.

Se mais de um tipo de elemento da vegetação existir numa camada, os valores dos parâmetros da teoria KM devem ser obtidos para cada um destes separadamente e os resultados

devem ser somados, uns aos outros, para se obter o resultado para todo o dossel. O número de camadas pode ser arbitrário.

TABELA 2.2 RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DESCRITOS NO MODELO SUITS, OS PARÂMETROS DO DOSSEL E OS PARÂMETROS DA TEORIA KM

Suits	Relação com os parâmetros do dossel	KM
$E_+$		$E_+$
$E_-$		$E_-$
$E_s$		$F_-$
$a$	$H'(1-\tau)+V'[1-(\rho+\tau)/2]$	$\alpha+\gamma$
$b$	$H'\rho+V'[(\rho+\tau)/2]$	$\gamma$
$c$	$H'\rho+(2/\pi)V'[(\rho+\tau)/2]\tan \theta_s$	$S_1$
$c'$	$H'\tau+(2/\pi)V'[(\rho+\tau)/2]\tan \theta_s$	$S_2$
$k$	$H'+(2/\pi)V'\tan \theta_s$	$k+S_1+S_2$
$K$	$H'+(2/\pi)V'\tan \theta_v$	
$u$	$H'\tau+(2/\pi)V'[(\rho+\tau)/2]\tan \theta_v$	
$v$	$H'\rho+(2/\pi)V'[(\rho+\tau)/2]\tan \theta_v$	
$w'$	$H'\rho+(1/2\pi)V'\tan \theta_v \tan \theta_s [(\sin \psi + (\pi-\psi) \cos \psi)\rho + (\sin \psi - \psi \cos \psi)\tau]$	

Fonte: GOEL(1988)

As equações são solucionadas para três fluxos, usando-se condições de contorno apropriadas, as quais são necessárias para estimar as continuidades dos fluxos ascendente e descendente em cada limite das camadas consideradas. Por exemplo, os fluxos difuso e especular incidentes deverão ser respectivamente iguais aos fluxos difuso e especular proximamente no topo do dossel. Estas condições de contorno usam dois outros parâmetros que são a reflectância hemisférica do solo e a fração SKYL.

A radiância total  $I$  é assumida como sendo a soma de três campos: o campo difuso ascendente e descendente, e o campo especular descendente atenuado. A Função Fase  $p(\mu, \psi; \mu', \psi')$  é assumida como a soma das três partes  $(\mu, v, w')$  correspondentes aos três campos. Os parâmetros  $\mu$  e  $v$  representam respectivamente o coeficiente de espalhamento para os fluxos difusos  $E_+$  e  $E_-$  e  $w'$  é o coeficiente de espalhamento bidirecional para o fluxo especular  $F_-$  na direção de visada. Cada uma destas Funções Fase são expressas em termos dos parâmetros do dossel mencionados, do zênite de visada  $\theta_v$  e do azimute relativo entre a iluminação e a visada ( $\psi$ ).

Para solucionar a equação de transferência radiativa, a solução das equações KM é usada para calcular o valor (arbitrário) inicial para  $I$ , a qual conjuntamente com a Função Fase é usada para calcular a função fonte  $K$ , usando a equação 2.11. Este valor de  $K$  é então substituído na equação 2.10, de onde estima-se o valor de  $I$  numa direção em particular. Utilizando a notação proposta por SUITS (1972), os fluxos mencionados são dados pelas seguintes equações:

$$dE_s/dz = kE_s \quad (2.30)$$

$$dE_-/dz = aE_- - bE_+ - c'E_s \quad (2.31)$$

$$dE_+/dz = bE_- - aE_+ + cE_s \quad (2.32)$$

$$dE_v/dz = \mu E_+ + vE_- + w'F_+ - KE_v \quad (2.33)$$

onde:  $k$  = coeficiente de extinção para a radiância especular de visada.

A reflectância do dossel é então dada por:

$$R = E_v / (E_{sol} + E_{céu}) \quad (2.34)$$

onde:  $E_{sol}$  e  $E_{céu}$  são as irradiâncias especular e difusa no



topo do dossel, respectivamente ( $z=0$ ), ou seja:

$$F_-(z=0)=E_{sol} \quad (2.35)$$

$$E_-(z=0)=E_{céu} \quad (2.36)$$

$$SKYL=E_{céu}/(E_{céu}+E_{sol}) \quad (2.37)$$

A pressuposição de que todas as folhas são horizontais ou verticais, em realidade simplifica a matemática do modelo. Ela permite a solução para o cálculo da reflectância de uma simples folha, como também para o caso de um dossel composto por diferentes camadas. Para uma única camada, a reflectância total é dada pela soma:

$$R=R_s+R_d+R_{solo} \quad (2.38)$$

onde:  $R_s$ = contribuições do fluxo direto;

$R_d$ = contribuições do fluxo difuso;

$R_{solo}$ = contribuições do solo.

As expressões específicas destas contribuições são dadas por:

1. contribuição  $R_s$ ==> seja  $p_s(z)$  a probabilidade de um elemento da vegetação na localização  $z$ , sendo iluminado pelo Sol, e seja  $p_o(z)$  a probabilidade deste elemento ser observado fora do dossel. Estas probabilidades são dadas por:

$$p_s(z)= \exp(kz) \quad (2.39)$$

$$p_o(z)= \exp(Kz), \quad z \leq 0 \quad (2.40)$$

Por conseguinte a probabilidade  $p_{os}(z)$  para observar o elemento iluminado é:

$$p_{os}(z)=p_s(z)p_o(z)=\exp[(k+K)z] \quad (2.41)$$

A contribuição na reflectância é dada por:

$$R_s = \int_{-h}^0 w' (1-SKYL) \rho_s(z) dz \implies$$

$$R_s = \int_{-h}^0 w' (1-SKYL) [1 - \exp[-(k+K)h]] / (k+K) ] \quad (2.42)$$

. contribuição  $R_d \implies$

$$R_d = \int_{-h}^0 [\mu E_+(z) + \nu E_-(z)] \rho_o(z) dz / (E_{céu} + E_{sol}) \quad (2.43)$$

onde:  $\mu$  e  $\nu$  são coeficientes de  $E_+$  e  $E_-$ .

. contribuição do solo  $R_{solo} \implies$

$$R_{solo} = \rho_s [E_-(-h) + E_s(-h)] \exp(-Kh) / (E_{céu} + E_{sol}) \quad (2.44)$$

Desta forma tem-se que:

$$R = \left\{ \left[ \int_{-h}^0 w' (1-SKYL) [1 - \exp[-(k+K)h]] / (k+K) ] + \left[ \int_{-h}^0 [\mu E_+(z) + \nu E_-(z)] \rho_o(z) dz \right] / (E_{céu} + E_{sol}) \right] + \left[ \rho_s [E_-(-h) + E_s(-h)] \exp(-kh) / (E_{céu} + E_{sol}) \right] \right\} \quad (2.45)$$

A atenção dedicada à este modelo tem sido justificada mais pela sua simplicidade em relacionar a reflectância com os parâmetros relativos ao dossel, do que à concordância entre os resultados obtidos através do modelo e aqueles determinados experimentalmente em condições de campo. As diferenças entre estes resultados podem ser explicados pelas pressuposições de continuidade e homogeneidade (uniformidade) do dossel, que nem sempre são satisfeitas (GOEL, 1988). Este autor menciona que o modelo consegue, ao menos qualitativamente, observar as dependências da reflectância do dossel com as geometrias de iluminação e de visada, com os próprios parâmetros do dossel

(IAF e DAF) e com a reflectância do solo. Pesquisadores como por exemplo CHANCE e LEMASTER (1977) testaram este modelo para dosséis de algodão e trigo, tendo sido encontrado um ajuste fraco entre os valores calculados pelo modelo e aqueles medidos em campo. Mais tarde, CHANCE e LEMASTER (1985) realizaram um trabalho da mesma natureza com dosséis de soja, tendo sido confirmado um ajuste moderado entre estes valores na região do visível e um ajuste fraco na região do infravermelho. Ainda pode-se citar os trabalhos de CHANCE (1977), CHANCE e LEMASTER (1978).

### 2.3.3 O modelo SAIL

O modelo Suits foi então aprimorado por VERHOEF e BUNNIK(1981), apud GOEL(1988), de forma a incluir a DAF como parâmetro de entrada, sendo por isso denominado "Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves" (SAIL).

Quando as folhas são assumidas arbitrariamente distribuídas, os nove coeficientes ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $c'$ ,  $k$ ,  $K$ ,  $\mu$ ,  $v$  e  $w'$ ) do modelo Suits, são funções de  $\theta_1$  e  $\psi_1$ , que representam o zênite e azimuth das folhas, respectivamente. A dependência funcional é determinada pela Função Densidade de Orientação de Área Foliar  $g(\theta_1, \psi_1)$ . De acordo com esta função, a fração de IAF orientada segundo essa função dá-se dentro de um ângulo sólido  $dw_1$  e é dada por:

$$d^2 IAF(\theta_1, \psi_1) = (IAF) g(\theta_1, \psi_1) dw = (IAF) g(\theta_1, \psi_1) \sin \theta_1 d\theta_1 d\psi_1 \quad (2.46)$$

No modelo SAIL assume-se que o azimuth foliar é distribuído aleatoriamente. Neste caso a Função Densidade de

Inclinação  $f(\theta_1)$  é relacionada a  $g(\theta_1, \psi_1)$  por:

$$f(\theta_1) = 2\pi g(\theta_1, \psi_1) \sin \theta_1 \quad (2.47)$$

Em termos desta função, as dependências funcionais dos nove coeficientes do modelo Suits em  $\theta_1$  ficam conforme apresentado na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 DEPENDÊNCIAS FUNCIONAIS DOS COEFICIENTES DOS MODELOS SUITS E SAIL EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS FOLHAS

SUITS	SAIL	EXPRESSÕES
a	$a(\theta_1)$	$L' [1 - (\rho + \tau)/2 + \{(\rho - \tau)/2\} \cos^2 \theta_1]$
b	$\sigma(\theta_1)$	$L' - a(\theta_1)$
c	$s'(\theta_1)$	$\{(\rho + \tau)/2\} k(\theta_1) + \{(\rho - \tau)/2\} L' \cos^2 \theta_1$
c'	$s(\theta_1)$	$\{(\rho + \tau)/2\} k(\theta_1) - \{(\rho - \tau)/2\} L' \cos^2 \theta_1$
k	$k(\theta_1)$	$(2/\pi) L' [(\beta_s - \pi/2) \cos \theta_1 + \sin \beta_s \tan \theta_s \sin \theta_1]$
K	$K(\theta_1)$	$(2/\pi) L' [(\beta_v - \pi/2) \cos \theta_1 + \sin \beta_v \tan \theta_v \sin \theta_1]$
$\mu$	$\mu(\theta_1)$	$\{(\rho + \tau)/2\} K(\theta_1) - \{(\rho - \tau)/2\} L' \cos^2 \theta_1$
v	$v(\theta_1)$	$\{(\rho + \tau)/2\} K(\theta_1) + \{(\rho - \tau)/2\} L' \cos^2 \theta_1$
w'	$w(\theta_1)$	$(2/\pi) L' [\{\pi \rho - \beta_2(\rho + \tau)\} \{2 \cos^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_1 \tan \theta_v \cos \psi\} + (\rho + \tau) \sin \beta_2 \{2 \cos^2 \theta_1 / (\cos \beta_s \cos \beta_v) + \cos \beta_1 \cos \beta_3 \sin^2 \theta_1 \tan \theta_s \tan \theta_v\}]$

Fonte: GOEL(1988)

onde:  $L' = IAF/h$  ( $h$ =espessura do dossel)

$$\beta_s = \arccos(-\cot \theta_s \cot \theta_1)$$

$$\beta_v = \arccos(-\cot \theta_v \cot \theta_1)$$

O ângulo  $\beta_s$  se refere ao ângulo crítico, tal que se  $\psi < \beta_s$  o feixe direto da radiação incidente atingirá a face ventral da folha; e se  $\psi > \beta_s$ , este feixe incidirá sobre a face dorsal; e para  $\psi = \beta_s$  então o feixe será paralelo à folha. A mesma

interpretação é dada para o ângulo  $\beta v$ , agora considerando a visada da folha. Os ângulos azimutais auxiliares 1, 2, e 3 são determinados segundo o seguinte quadro de decisão apresentado na Tabela 2.4.

TABELA 2.4 QUADRO DE DECISÃO PARA OS ÂNGULOS AZIMUTAIS AUXILIARES

SE	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$
$\psi \leq \beta s - \beta v$	$\psi$	$\beta s - \beta v$	$2\pi - \beta s - \beta v$
$\beta s - \beta v < \psi < 2\pi - \beta s - \beta v$	$\beta s - \beta v$	$\psi$	$2\pi - \beta s - \beta v$
$\psi \geq 2\pi - \beta s - \beta v$	$\beta s - \beta v$	$2\pi - \beta s - \beta v$	$\psi$

Fonte: GOEL(1988)

Pelo exposto fica claro que o modelo Suits, no qual a vegetação é constituída por folhas verticais e horizontais, é um caso especial do modelo SAIL. Sendo as frações horizontal e vertical de área foliar denotadas por  $F(0)$  e  $F(\pi/2)$ , respectivamente, e seja  $L'$  a densidade de área foliar, as densidades horizontal e vertical  $H'$  e  $V'$  (vide equações 2.27 e 2.28) são definidas então por:

$$H' = L' F(0) \text{ e } V' = L' F(\pi/2) \quad (2.48)$$

Nos programas computacionais considerados neste trabalho a DAF de uma dada camada do dossel é discretizada em 13 classes de ângulos de inclinação  $\theta_1$ , localizados nos centros dos intervalos  $0^\circ$ - $10^\circ$ ,  $10^\circ$ - $20^\circ$ , ...,  $70^\circ$ - $80^\circ$  e  $80^\circ$ - $82^\circ$ ,  $82^\circ$ - $84^\circ$ , ...,  $88^\circ$ - $90^\circ$ . As quatro últimas classes, ditas mais refinadas, se devem ao fato de que o coeficiente de extinção  $K$  e os coeficientes de espalhamento  $\mu$ ,  $v$  e  $w$  são muito sensíveis às variações da DAF para estes valores de  $\theta_1$ , quando o ângulo

zenital de visada  $\theta_v$  estiver próximo do nadir.

O modelo SAIL vem sendo avaliado principalmente para aplicações em culturas agrícolas. RANSON et al. (1981) geraram dados de reflectância bidirecional de dosséis homogêneos de soja, referentes a 12 direções de iluminação, os quais têm sido utilizados por pesquisadores para avaliar os resultados alcançados na determinação destes mesmos dados através do modelo SAIL e até de outros modelos de reflectância da vegetação. GOEL e DEERING (1985) avaliaram o modelo SAIL na determinação da reflectância bidirecional de dosséis de gramíneas e soja. Para tanto os autores confrontaram os valores medidos de reflectância com aqueles calculados através do modelo, mediante a estimativa dos parâmetros de entrada. Esta comparação foi feita utilizando a raiz quadrada da média quadrática, aqui denominada RQM, e definida por:

$$RQM = [\sum (R_m - R_c)^2 / N]^{1/2} \quad (2.49)$$

onde:  $R_m$  = valor medido de reflectância;

$R_c$  = valor calculado de reflectância;

$N$  = número de observações.

FUSCO e TREVESE (1985) utilizaram este parâmetro como critério de comparação entre dados provenientes do sensor orbital Thematic Mapper (TM) e aqueles obtidos através de métodos de simulação de defeitos do sensor. KRUG (1991) propôs a padronização de RQM, usada por estes dois autores, pelo desvio padrão dos dados medidos (observados) com o objetivo de permitir sua comparação entre bandas espectrais, uma vez que

entre os dados provenientes de bandas espectrais diferentes são observadas dispersões distintas. Tem-se portanto:

$$RQMP = 1/S_m [\sum (R_m - R_c)^2 / N]^{1/2} \quad (2.50)$$

onde: RQMP= raiz quadrada da média quadrática padronizada;  
 $S_m$ = desvio padrão de  $R_m$ .

VALERIANO (1992) analisou a reflectância espectral de dosséis de trigo (*Triticum aestivum* L.) em função de suas variáveis biofísicas, baseando-se em dados experimentais e em resultados do modelo SAIL, avaliando ainda o potencial deste modelo na investigação da relação mencionada. O autor constatou que os resultados obtidos pelo modelo apresentaram comportamento semelhante aos dados observados em campo.

ANTUNES (1993) avaliou os desempenhos dos modelos SAIL e SUITS na estimativa da reflectância espectral de dosséis de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). O autor concluiu que os modelos apresentaram tendências semelhantes, porém o desempenho do modelo SAIL foi superior ao do modelo SUITS.

A abordagem enfocada até o momento levou em consideração o modelo de reflectância da vegetação como um procedimento de se estimar a reflectância de um dossel mediante o conhecimento dos parâmetros biofísicos, espectrais e geométricos do próprio dossel, seus componentes, da fonte de REM e do sensor. Contudo, conforme mencionado anteriormente, a grande contribuição prática do uso destes modelos se refere ao já citado problema inverso, no qual são utilizados os valores de reflectância de um dossel, que através dos modelos, serviriam como subsídio para a estimativa dos parâmetros do dossel,

especialmente os biofísicos. Neste contexto, destacam-se os trabalhos de GOEL e DEERING(1985), GOEL e THOMPSON (1984a, 1984b) e GOEL et al.(1984c) que utilizaram o modelo SAIL com essa finalidade.

Em todos estes trabalhos o problema inverso consistiu na denominada inversão do modelo, a qual foi realizada através de uma função mérito definida por:

$$F = \sum w_i (Rm_i - Rc_i)^2 \quad i=1,2,\dots,n \quad (2.51)$$

onde:  $w_i$  = peso para cada  $i$ -ésima observação;

$Rm_i$  = valor medido de reflectância na  $i$ -ésima observação;

$Rc_i$  = valor calculado de reflectância na  $i$ -ésima observação.

Formalmente a solução do problema inverso, ou seja, da inversão do modelo, se dá com a minimização da função  $F$ . Este procedimento de minimização se inicia através da definição de um valor para o parâmetro ou parâmetros de entrada do modelo que se deseja estimar. Segue-se o processamento do modelo, que então determina o valor de  $Rc_i$ . Este valor é então subtraído de seu respectivo  $Rm_i$  e o somatório é realizado para todas as  $n$  observações desejadas. O cálculo de  $F$  segue estimando-se novos valores dos parâmetros de entrada desejados até que  $F$  atinja um valor mínimo. Uma vez que esse valor é atingido, verifica-se qual ou quais os valores finais dos parâmetros de entrada do modelo que passam então a constituir as estimativas desejadas.

GOEL e THOMPSON (1984a) demonstraram que o modelo pode ser invertido se medidas suficientes de reflectância do dossel



forem feitas no sentido de serem representativas de todos os parâmetros de iluminação e visada.

MAJOR et al. (1991) inverteram o modelo SAIL usando dados experimentais de dosséis de milho e encontraram que as diferenças sazonais ocorridas na DAF,  $\rho$  e  $\tau$  exerceram efeitos significativos no resultado da inversão.

MAJOR et al. (1992) utilizaram o modelo SAIL em três diferentes versões, sendo uma especialmente concebida para dosséis constituídos de uma só camada (unidimensional), outra versão denominada de bidimensional que levou em consideração a disposição das plantas em fileiras, e finalmente, uma terceira versão, também bidimensional, mas que levou em consideração o sombreamento causado pelas próprias fileiras e alturas das plantas.

Para a versão unidimensional, os resultados indicaram que a diferença entre os valores de reflectância medidos em campo e aqueles calculados pelo modelo, para dosséis menos densos, deveram-se à influência do solo, resultando em valores maiores de reflectância na região do vermelho e menores valores na região do infravermelho. Já as versões para duas camadas, atingiram desempenhos superiores. A principal diferença apontada pelos autores entre as versões bidimensionais verificou-se na proporção de solo iluminado pelo Sol.

Estes autores conduziram ainda uma análise de sensibilidade do modelo SAIL, na versão bidimensional modificada para incluir o efeito das sombras, variando um parâmetro de entrada e mantendo fixos todos os demais. Para a

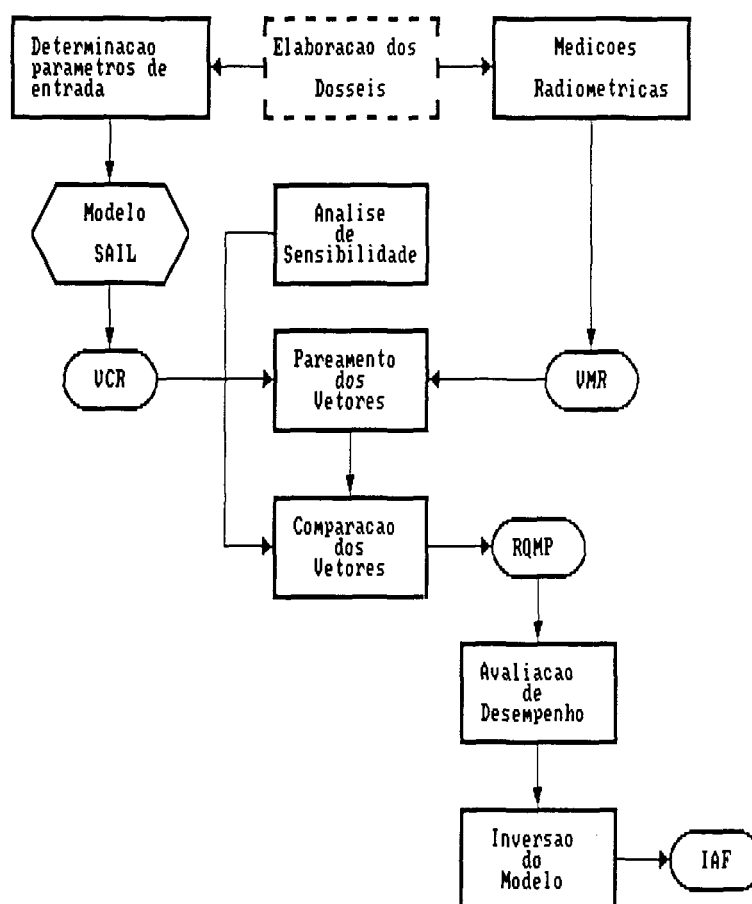
variação da DAF, os valores de reflectância calculados pelo modelo apresentaram pouca variação. Para os demais parâmetros, foi verificado que com o aumento do IAF, a reflectância na região do vermelho decresce, enquanto que na região do infravermelho ela cresce. Com o aumento de  $\rho_s$  a reflectância do dossel também aumenta e finalmente, aumentando  $\rho$  e  $\tau$ , a reflectância também aumentou.

ANTUNES (1993) conduziu uma análise de sensibilidade do modelo SAIL e verificou que a DAF e as propriedades espectrais das folhas foram os parâmetros para os quais o modelo apresentou maior sensibilidade.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 3.1 ilustra o fluxograma das principais atividades desenvolvidas neste trabalho.

FIGURA 3.1 FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS



A etapa denominada "elaboração dos dossês" referiu-se à seleção e disposição das mudas no terreno, de modo a formar os dossês nos quais foram efetuadas as medições radiométricas e determinados os valores dos parâmetros biofísicos e dos espectrais das folhas e do solo.

Das medições radiométricas originaram-se os Valores Medidos de Reflectância (VMRs) e, através do processamento do modelo SAIL, alimentado pelos parâmetros biofísicos e espectrais mencionados, bem como pelo demais parâmetros geométricos de iluminação e de visada, originaram-se os Valores Calculados de Reflectância (VCRs).

Estes dois tipos de valores (VMRs e VCRs) foram determinados para o intervalo espectral compreendido entre 0,40  $\mu\text{m}$  à 0,90  $\mu\text{m}$ , e foram organizados visando sua comparação através da operação denominada de pareamento dos vetores.

O pareamento dos vetores permitiu avaliar a dinâmica apresentada por ambos os valores em função das condições de iluminação e de visada e das características arquitetônicas dos dosséis. Através dos valores de RQMP foi possível avaliar o desempenho do modelo nas diferentes condições mencionadas.

Os resultados da etapa de avaliação do desempenho do modelo foram utilizados no procedimento de inversão do modelo visando a estimativa do IAF.

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade do modelo, serviram para analisar os resultados da comparação dos vetores, da avaliação do desempenho e da inversão do modelo.

A seguir são apresentados maiores detalhes sobre as etapas mencionadas e sobre os procedimentos e critérios adotados.

### 3.1 OS PROGRAMAS SAIL E CANOPY

O programa SAIL foi concebido de forma a considerar o dossel constituído por uma única camada e por um único componente.

O termo camada deve ser entendido aqui como aquele definido por SUITS (1972), o qual refere-se a uma faixa horizontal dentro do dossel que caracteriza-se por uma uniformidade em suas características arquitetônicas e espectrais de seus elementos constituintes. Assim como um dossel de trigo na fase adulta de desenvolvimento, por exemplo, pode ser dividido em duas camadas: uma delas seria ocupada pelas espigas que se projetam no topo do dossel e a outra camada seria localizada imediatamente abaixo desta primeira camada superior, sendo então constituída pelas folhas, colmos e pelo solo.

A entrada de dados deu-se mediante o uso de arquivos de dados, organizados de acordo com a sequência de leitura dos valores das variáveis. Essa sequência iniciou-se com a leitura do IAF do dossel. Em seguida foram lidas as frequências relativas das classes angulares da DAF, depois os vetores referentes às reflectâncias e transmitâncias hemisféricas do componente em questão, à fração difusa da radiação incidente e à reflectância hemisférica do solo, sendo todos estes parâmetros espectrais relativos a 51 intervalos de comprimentos de onda. Finalmente foram lidos os ângulos zenitais e azimutais de iluminação e visada.

O programa CANOPY foi concebido por VERHOEF e BUNNIK (1981), de forma a permitir o cálculo da reflectância de

dosséis com até 5 camadas compostas por no máximo 5 componentes diferentes cada. Para a presente pesquisa, o programa foi alterado para permitir o processamento de 6 situações de iluminação e de visada, contra as 5 da versão original. O objetivo dessa alteração foi o de incluir o número de situações consideradas na coleta de dados radiométricos.

A seqüência de leitura e processamento dos dados foi semelhante àquela descrita para o programa SAIL. Os cálculos foram realizados por camada, levando em consideração os aspectos geométricos e espectrais de seus componentes. Estes últimos foram posteriormente integrados resultando na reflectância total do dossel para uma dada condição de iluminação e de visada.

As Tabelas 3.1 e 3.2 contêm exemplos dos arquivos de dados de ambos os programas, respectivamente.

Comum a ambos os programas, encontra-se uma subrotina que constituiu essencialmente os procedimentos de cálculo do modelo SAIL, a qual encontra-se descrita no Apêndice A.

TABELA 3.1. EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE DADOS DO PROGRAMA SAIL

```

13.74 ==> IAF
0.3114 0.3115 0.1803 0.1312 0.0328 0.0164 0.0164 0.0000 0.0000 ==> DAF
3.80 0.00 8.33 37.34
3.80 0.07 8.40 35.53
4.20 0.23 8.44 33.66
4.48 0.50 8.53 31.84
4.76 0.70 8.61 30.17
4.98 1.07 8.70 28.99
5.02 1.38 8.71 27.48
4.97 1.42 8.73 26.40
4.96 1.49 8.79 25.11
4.95 1.70 8.89 24.12
5.19 2.44 9.03 22.97
6.05 4.25 9.17 21.88
8.00 7.24 9.34 21.11
10.05 9.85 9.55 20.14
11.01 11.08 9.86 19.44
11.63 11.92 10.32 18.57
11.89 12.32 10.96 17.94
11.28 11.79 11.80 17.11
10.45 11.07 12.70 16.56
10.16 10.86 13.60 15.87
10.16 10.98 14.37 15.39
9.61 10.50 14.99 14.78
8.62 9.43 15.44 14.32
8.28 9.12 15.80 13.88
7.65 8.25 16.11 13.40
6.25 6.06 16.44 13.02
5.37 4.60 16.79 12.56
4.65 2.82 17.14 12.33
4.80 2.57 17.54 11.93
6.99 6.84 17.90 11.64
17.12 19.32 18.27 11.54
29.84 30.83 18.64 11.48
39.36 38.47 18.94 11.54
45.53 43.27 19.24 11.48
48.71 45.72 19.48 11.54
50.00 46.82 19.63 11.56
50.28 47.19 19.70 11.57
50.21 47.35 19.73 11.51
50.14 47.42 19.70 11.41
50.07 47.51 19.61 11.34
49.98 47.52 19.49 11.29
49.92 47.63 19.35 11.31
49.88 47.69 19.21 11.33
49.82 47.75 19.06 11.26
49.80 47.84 18.93 11.32
49.78 47.93 18.82 11.35
49.76 48.03 18.73 11.41
49.76 48.10 18.65 11.47
49.70 48.15 18.60 11.67
49.70 48.22 18.57 12.28
49.58 48.25 18.56 12.94
0 65. 68. 0. 0. ==> Flag,  $\phi_s$ ,  $\psi_s$ ,  $\phi_v$  e  $\psi_v$ 

```

==>  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\rho_s$  e SKYL

TABELA 3.2 EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE DADOS DO PROGRAMA CANOPY

```

400. ]
410. ]
420. ]
430. ]
440. ==> comprimentos de onda considerados
450. ]
460. ]
470. ]
480. ]
490. ]
02 02 09.60 ==> números de camada e componentes e IAF total
16.15 29.27 ==> % dos componentes na primeira camada
44.79 09.79 ==> % dos componentes na segunda camada
06 ==> número de situações de iluminação consideradas
61.67 38.32 00.00 ]
58.55 37.10 15.00 ]
58.24 37.00 30.00 ==>  $\phi_s$ ,  $\psi_s$  e  $\phi_v$  das situações consideradas
86.68 57.63 00.00 ]
85.30 55.98 15.00 ]
85.20 55.85 30.00 ]
3.80 3.80 4.20 4.48 4.76 4.98 5.02 4.97 4.96 4.95 ==>  $\rho$  do comp. 1
0.00 0.07 0.23 0.50 0.70 1.07 1.38 1.42 1.49 1.70 ==>  $\tau$  do comp. 1
8.00 7.80 7.80 7.50 7.50 7.80 8.00 8.10 8.20 8.60 ==>  $\rho$  do comp. 2
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 ==>  $\tau$  do comp. 2
Ângulos dos centros das classes da DAF
5.00 15.00 25.00 35.00 45.00 55.00 65.00 75.00 81.00 83.00 85.00 87.00
DAF do componente 1 da camada 1
.2000 .2000 .2000 .2500 .1000 .0000 .0000 .0000 .0100 .0100 .0100 .010
DAF do componente 2 da camada 1
.0714 .2857 .1428 .1428 .1666 .0952 .0238 .0476 .0048 .0048 .0048 .004
DAF do componente 1 da camada 2
.4848 .1212 .1515 .0909 .0303 .0606 .0000 .0606 .0000 .0000 .0000 .000
DAF do componente 2 da camada 2
.0333 .3667 .2667 .2000 .1000 .0333 .0000 .0000 .0000 .0000 .0000 .000
8.33 8.40 8.44 8.53 8.61 8.70 8.71 8.73 8.79 8.89 ==>  $\rho_s$ 
58.78 58.52 58.01 57.24 56.65 56.40 56.02 55.61 55.10 54.49 ]
58.78 58.52 58.01 57.24 56.65 56.40 56.02 55.61 55.10 54.49 ]
58.78 58.52 58.01 57.24 56.65 56.40 56.02 55.61 55.10 54.49 ==> SKYL
21.76 20.42 19.05 17.75 16.58 15.80 14.79 14.10 13.26 12.44 ]
21.76 20.42 19.05 17.75 16.58 15.80 14.79 14.10 13.26 12.44 ]
21.76 20.42 19.05 17.75 16.58 15.80 14.79 14.10 13.26 12.44 ]

```

### 3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO SAIL

Esta etapa teve como objetivo fornecer informações sobre a sensibilidade do modelo SAIL em relação às variações dos valores dos parâmetros de entrada. Para tanto, foram realizadas simulações no modelo, promovendo variações em cada um destes parâmetros individualmente.

Estas variações foram feitas percentualmente, com exceção dos parâmetros angulares, procurando respeitar os limites reais de suas ocorrências no âmbito dos experimentos



conduzidos neste trabalho. Estas variações percentuais foram denominadas de Percentagens de Variação (PV) e serviram também para expressar as alterações dos VCRs determinados pelo modelo. Assim, as conclusões sobre a sensibilidade do modelo foram realizadas levando em consideração as PVs de cada parâmetro de entrada e as respectivas PVs dos VCRs.

Para os parâmetros angulares, incluindo a DAF, foram analisadas as tendências dos VCRs em relação às variações angulares promovidas nas simulações.

Ao final do processamento do modelo em sua versão para dosséis constituídos por uma camada apenas (SAIL), foi montado um arquivo contendo 51 VCRs, referentes ao intervalo de  $0,40\mu\text{m}$  a  $0,90\mu\text{m}$ . Para facilitar a interpretação dos resultados da análise de sensibilidade, optou-se por dividir este intervalo em quatro bandas espectrais, a saber:

- Banda 1 ==>  $0,45 - 0,52\mu\text{m}$  (Azul);
- Banda 2 ==>  $0,52 - 0,60\mu\text{m}$  (Verde);
- Banda 3 ==>  $0,63 - 0,69\mu\text{m}$  (Vermelho);
- Banda 4 ==>  $0,76 - 0,90\mu\text{m}$  (Infravermelho próximo).

Assim, para cada uma destas bandas foram determinados os valores médios dos VCRs em cada comprimento de onda, sobre os quais foram determinadas as PVs mencionadas.

A comparação entre as Porcentagens de Variação (PVs) dos Valores Calculados de Reflectância (VCRs) com as PVs de um dado parâmetro de entrada serviu para verificar a sensibilidade do modelo. Adicionalmente optou-se por determinar também os Coeficientes de Variação (CV), tanto dos parâmetros de entrada quanto dos respectivos VCRs, para verificar a dispersão dos dados..

Os parâmetros de entrada do modelo foram:

Parâmetros arquitetônicos: IAF (adimensional);

DAF (Frequência relativa);

Parâmetros espectrais:  $\rho$  (%),  $\tau$  (%),  $\rho_s$  (%) e SKYL (%);

Parâmetros geométricos:  $\theta_v$ ,  $\theta_s$ ,  $\psi_v$  e  $\psi_s$  (todos em graus).

A seguir serão apresentadas as considerações referentes as simulações destes parâmetros visando a Análise de Sensibilidade do modelo.

### 3.2.1 Índice de Área Foliar (IAF)

Nas simulações envolvendo variações dos valores do IAF, foram consideradas duas situações distintas de iluminação, sendo uma relativa ao período da manhã ( $\theta_s=65^\circ$ ,  $\psi_s=68^\circ$ ) e outra relativa ao período da tarde ( $\theta_s=34^\circ$ ,  $\psi_s=333^\circ$ ). Os valores referentes à geometria de iluminação em cada uma destas situações foram definidos arbitrariamente, levando em consideração valores reais para a latitude e a longitude da área e a época do ano onde e quando foram conduzidos os experimentos de campo. Ainda, em cada uma destas situações de iluminação foram considerados os ângulos zenitais de visada ( $\theta_v$ ) de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ , e  $30^\circ$ . Os valores de IAF também foram definidos procurando-se abranger os valores encontrados na coleta de dados durante os trabalhos de campo, o que implicou em valores variando de 0,5 a 4,0, a intervalo de 0,5 em 0,5, ou seja, foram considerados os valores 0,5, 1,5, 2, ..., 4,0 para os IAFs em cada processamento do modelo em cada situação de iluminação e de visada.

### 3.2.2 Distribuição Angular de Folhas (DAF)

A simulação dos valores das DAFs levou em consideração o ângulo médio de inclinação das folhas, valor este calculado através da própria DAF que foi expressa pela frequência relativa das classes dos ângulos de inclinação das folhas. Foram utilizadas DAFs que implicaram em ângulos médios de  $15^{\circ}$ ,  $18^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $22^{\circ}$  e  $24^{\circ}$ ; amplitude esta de valores que incluiu com segurança os valores de ângulos médios encontrados nos dosséis considerados neste trabalho. O modelo foi processado para cada um destes ângulos e para  $\Theta_V = 0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ , e ainda, para os horários de 7:00, 9:00, 11:00 e 13:00 horas.

Para estas simulações, foram estabelecidos dois valores de IAF, sendo um 0,5 e o outro 4,0, por serem muito próximos dos valores de IAF mínimo e máximo encontrados, respectivamente, nos dosséis considerados.

### 3.2.3 Visada ( $\Theta_V, \psi_V$ )

A sensibilidade do modelo em relação às variações de  $\Theta_V$  foi estudada para  $\Theta_V = 5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ ,  $55^{\circ}$ , e  $60^{\circ}$ , mantendo-se fixo o valor  $\psi_V$  em  $335^{\circ}$ , para dois valores de IAF (0,5 e 4,0) e para duas condições de iluminação (manhã:  $\Theta_S = 65^{\circ}$ ,  $\psi_S = 68^{\circ}$  e tarde:  $\Theta_S = 34^{\circ}$ ,  $\psi_S = 333^{\circ}$ ). Os demais parâmetros foram mantidos fixos.

As simulações envolvendo o estudo do efeito das variações de  $\psi_V$ , foram conduzidas para  $\psi_V = 0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ,  $225^{\circ}$ ,  $270^{\circ}$ , e  $315^{\circ}$ , considerando a iluminação da manhã ( $\Theta_S = 65^{\circ}$ ,  $\psi_S = 68^{\circ}$ ),  $\Theta_V = 15^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ , e IAFs de 0,5 e 4,0.

Nas simulações, tanto para o estudo de  $\Theta_v$  quanto de  $\Psi_v$ , foi considerada uma DAF cujo ângulo médio de inclinação foliar foi igual à  $18^\circ$ .

#### 3.2.4 Iluminação ( $\Theta_s, \Psi_s$ )

Para o estudo da sensibilidade do modelo em relação às variações na geometria de iluminação, foram considerados os horários entre 7:00 e 17:00, em intervalos de uma hora, e dois valores de IAFs (0,5 e 4,0).

Nestas simulações foi considerada uma DAF cujo ângulo médio de inclinação foliar foi igual à  $18^\circ$ , caracterizando um dossel do tipo planófilo, e ainda o valor de  $\Theta_v$  foi mantido fixo e igual à  $0^\circ$ .

#### 3.2.5 Reflectância e Transmitância hemisféricas das folhas

Para a determinação dos valores de ambos os parâmetros, foram adotados os seguintes critérios:

1. Das curvas de  $\rho$  e  $\tau$ , obtidas em laboratório envolvendo as folhas e a esfera integradora, foi selecionado arbitrariamente um par de curvas ( $\rho$  e  $\tau$ ) de uma folha de Eucalipto. Este par de curvas foi composto por 51 valores (intervalos de comprimentos de onda) de  $\rho$  e os respectivos valores de  $\tau$ , dentro do intervalo compreendido entre  $0,4\mu\text{m}$  e  $0,9\mu\text{m}$ ;

2. De cada um destes 51 valores de cada parâmetro (vetores) foram subtraídos os percentuais de 60%, 40% e 20%, originando três novos conjuntos de 51 valores para cada parâmetro.

Cada ( $\rho$  e  $\tau$ ) par de 51 valores foi então submetido ao processamento do modelo adotando-se  $\theta_s=65^\circ$ ,  $\psi_s=68^\circ$  e  $\theta_v=0^\circ$ , como situações de iluminação e visada, uma vez que estas geometrias constituíram dados reais do experimento.

Para análise dos resultados foram determinadas as médias dos valores simulados de  $\rho$  e  $\tau$  para as quatro bandas espectrais mencionadas, das quais foram determinados os valores de PV e CV.

### 3.2.6 Reflectância hemisférica do solo ( $\rho_s$ )

Foi adotado um critério semelhante àquele do item anterior, no que se refere aos percentuais de variação dos valores de  $\rho_s$ . Assim, os 51 valores de  $\rho_s$ , encontrados na coleta de dados radiométricos realizada em laboratório, foram considerados como ponto de partida na definição dos demais valores a serem submetidos ao processamento do modelo. Destes foram então subtraídos os mesmos percentuais de 60%, 40% e 20% e acrescidos estes mesmos percentuais, originando 7 conjuntos de 51 valores.

Cada conjunto foi submetido ao processamento do modelo, adotando-se os IAFs de 4,0 e 0,5, que representaram situações diametralmente opostas de cobertura do solo.

Duas situações bastante antagônicas visando portanto a avaliação da sensibilidade do modelo quanto a variações de  $\rho_s$  em duas situações diametralmente opostas de exposição. A variação atribuída aos valores de IAF deveu-se ao fato de que esperava-se sensibilidades diferenciadas do modelo em relação a estes dois valores para as variações de  $\rho_s$ .

Foram também determinadas as médias de  $\rho_s$  para cada uma das quatro bandas espectrais mencionadas, das quais foram calculados as PVs e CVs.

### 3.2.7 Fração de irradiância difusa (SKYL)

Foram mantidas fixas as condições de visada e de geometria de iluminação, bem como todos os demais parâmetros, e foi considerado o vetor SKYL (de  $0,4\mu\text{m}$  a  $0,9\mu\text{m}$ ) que continha os menores valores como ponto de partida para a determinação dos demais vetores deste parâmetro a serem utilizados no modelo. A cada elemento deste vetor foi adicionado uma constante (5) arbitrariamente definida, para todos os comprimentos de onda, para o cálculo do próximo vetor a ser utilizado na simulação. Foram obtidos tantos vetores quanto o número de simulações pretendidas, que foi definido como 11 simulações.

## 3.3 COLETA DE DADOS

Nesta etapa foram realizadas coletas de dados em campo e em laboratório. No campo, foram coletados os dados biofísicos e radiométricos de pontos dos dosséis, dos quais haviam sido extraídos os dados radiométricos (IFOVs). Em laboratório, foram determinadas a reflectância e a transmitância hemisféricas ( $\rho$  e  $\tau$ ) de folhas isoladas constituintes destes mesmos dosséis, e a reflectância hemisférica do solo ( $\rho_s$ ).

A coleta de dados em campo foi efetuada nas dependências da Fazenda Rio Claro de propriedade da DURAFLORA S/A, localizada no município de Lençóis Paulista - SP, tendo como

área experimental o viveiro de mudas de *Eucalyptus* sp. (Eucalipto) e de outras essências florestais.

A Figura 3.2 ilustra a localização geográfica da cidade de Lençóis Paulista, aonde situa-se o viveiro mencionado.

FIGURA 3.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA CIDADE DE LENÇÓIS PAULISTA



As determinações de  $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$  foram realizadas nas dependências do Centro de Pesquisa Agrícola da UNICAMP (CEPAGRI/UNICAMP), localizado na cidade de Campinas - SP.

### 3.3.1 Coleta de dados em campo

#### 3.3.1.1 Elaboração dos dosséis

Três diferentes dosséis foram organizados no terreno, em função da composição florística e características estruturais. Eles eram compostos por mudas de essências florestais com alturas que variaram de 15 a 50 cm.

O primeiro dossel, formado por mudas de Eucalipto, tinha uma altura média de 40 cm. As mudas estavam plantadas em recipientes plásticos de 5 cm de diâmetro, posicionadas lado a lado no terreno, resultando numa distância de 5 cm entre mudas. Este dossel foi então disposto sob a forma de um canteiro com aproximadamente 25 m de comprimento por 1,20 m de largura. A Figura 3.3 apresenta o aspecto deste canteiro.

O segundo dossel foi constituído por mudas de *Aspidosperma sp.* (Peroba), medindo entre 15 e 30 cm de altura, as quais haviam sido plantadas em sacos plásticos de 12,5 cm de diâmetro. Estas mudas, uma vez posicionadas lado a lado no terreno, ficaram distanciadas entre si também de 12,5 cm. As dimensões deste segundo canteiro foram de 10 m de comprimento por 1,20m de largura.



FIGURA 3.3 ASPECTO DO CANTEIRO DE EUCALIPTO



A Figura 3.4 ilustra o aspecto do canteiro de Peroba.

O terceiro e último dossel foi constituído pela mistura de mudas das duas espécies na proporção de 50% cada. Para tanto o canteiro de peroba anteriormente descrito, foi aproveitado de forma que as mudas de Eucalipto plantadas em tubetes, foram posicionadas entre as mudas de Peroba, aproveitando os espaços existentes entre os sacos plásticos, o que resultou numa distância de 6,25cm entre mudas. Evidentemente este terceiro canteiro somente foi constituído

após a realização de todas as medidas radiométricas do segundo dossel.

FIGURA 3.4 ASPECTO DO CANTEIRO DE PEROBA

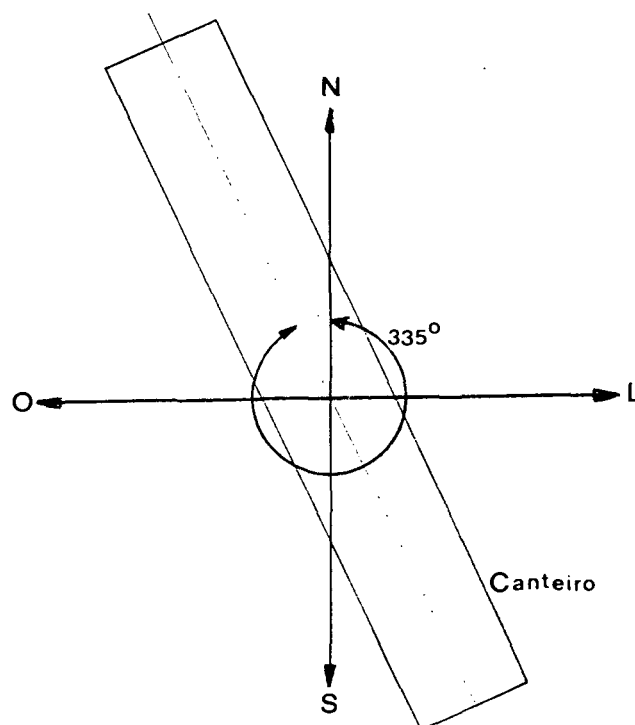


A orientação espacial destes três canteiros foi a mesma, a qual encontra-se apresentada esquematicamente na Figura 3.5.

As mudas de Eucalipto utilizadas na constituição do terceiro canteiro apresentaram uma altura ligeiramente menor (aproximadamente 10 cm) do que a altura das mudas de Peroba. A existência de duas espécies no terceiro dossel foi tratada de

duas formas distintas durante o processamento do modelo nas duas versões (SAIL e CANOPY). Na primeira, a única camada constituinte do dossel foi tratada como uma média, ou seja, tanto os parâmetros biofísicos quanto os espectrais das folhas, foram transformados em valores médios. Na segunda, foi considerada a existência de duas camadas, sendo uma constituída pelas mudas de Peroba e outra pelas mudas de Eucalipto. A distância vertical entre as mudas de ambas as espécies não foi, neste caso, o parâmetro que influenciou na decisão de se considerar duas camadas, mas sim as diferenças espectrais de ambas as espécies.

FIGURA 3.5 ORIENTAÇÃO ESPACIAL DOS DOSSÉIS NO TERRENO



O tipo de solo utilizado no plantio das mudas de ambas as espécies e no recobrimento dos canteiros após suas disposições no terreno foi o Latossolo Vermelho Escuro. Esse recobrimento foi necessário para o ocultamento das bordas superiores dos sacos plásticos e tubetes nos quais as mudas haviam sido plantadas.

### 3.3.1.2 Coleta de dados biofísicos

Por dados biofísicos compreendem-se o Índice de Área Foliar (IAF) e a Distribuição Angular de Folhas (DAF) dos dosséis. Estes dados foram determinados para cada um dos IFOVs definidos durante as medições radiométricas.

A determinação do IAF foi feita segundo metodologia descrita por KVET e MARCHALL (1971), apud DAUGHTRY (1990), na qual a área da folha (representada pela superfície de uma face somente) é determinada através de um modelo de regressão linear simples que leva em consideração as dimensões lineares da folha (largura e comprimento). O modelo adotado foi do tipo:

$$y=a+bx \quad (3.1)$$

onde:  $y$ = área da folha;

$x$ = produto entre largura e comprimento da folha;

$a$  e  $b$ = coeficientes da regressão.

Para a determinação dos coeficientes da regressão foram medidas as áreas, larguras e comprimentos de 150 folhas de Eucalipto e de 100 folhas de Peroba. Para tanto, estas folhas foram coletadas, fixadas em papel sulfite e fotocopiadas. As

copias das folhas tiveram suas áreas determinadas através do uso de mesa digitalizadora e um programa específico para determinações dessa natureza denominado "CAREAV". As demais dimensões foram determinadas através do uso de régua milimetrada. Procedeu-se à determinação dos coeficientes da regressão, tendo então como variável independente os produtos Largura x Comprimento das folhas e como variável dependente suas respectivas áreas.

Optou-se pela seleção aleatória de quatro mudas em cada IFOV, que tiveram suas folhas medidas quanto à largura e ao comprimento. Através das equações de regressão estabelecidas para cada espécie, as áreas destas folhas foram estimadas e o IAF foi então determinado pela seguinte equação:

$$IAF_i = \frac{A_i \text{ total}}{A_m} \quad (3.2)$$

onde:  $i$  = iésimo IFOV;

$A_{\text{total}}$  = área total das folhas no iésimo IFOV;

$A_m$  = área do terreno ocupada pelas quatro mudas;

$IAF$  = IAF do iésimo IFOV.

O valor de  $A_m$  foi dependente do tamanho dos recipientes utilizados no plantio das mudas e de sua disposição no terreno.

Considerando o dossel de Eucalipto, as quatros mudas em questão ocuparam uma área de  $100 \text{ cm}^2$ , enquanto que no dossel de Peroba esta área foi de  $625 \text{ cm}^2$ . Para a determinação do IAF do dossel composto por mudas de Eucalipto + Peroba, foram consideradas as duas equações de regressão definidas e ainda foi considerada a existência de duas camadas no dossel, sendo



cada uma destas compostas tanto por folhas de Eucalipto como de Peroba. As espessuras das camadas foram definidas pelas diferenças entre as alturas das mudas das duas espécies. As mudas de Eucalipto eram menores do que as de Peroba em aproximadamente 10 cm. Desta forma, a primeira camada ficou estabelecida como sendo os primeiros 10 cm a partir do topo do dossel, enquanto a segunda camada os 15 cm restantes. Esta separação em camadas foi necessária para o processamento da versão CANOPY.

Os IAFs de ambas as camadas foram determinados separadamente. Para o processamento da versão SAIL estes IAFs foram somados, o que resultou nos IAFs totais de cada IFOV.

Diante de incertezas quanto à significância da amostragem adotada para o cálculo do IAF dos IFOVs, foram determinados erros que estariam sendo cometidos nessa amostragem, considerando o número de folhas medidas. Esses erros foram calculados através da seguinte equação (GOMES, 1978):

$$E^2 = \frac{t^2 cv^2}{n} \quad (3.3)$$

onde: E= erro admitido (30%);

t= 1,96 para 95% de probabilidade;

cv= coeficiente de variação das áreas determinadas através da regressão;

n= número de folhas considerado.

O número "n" de folhas foi definido como o menor número de folhas encontrado num conjunto de 4 mudas, para ambas as espécies, embora tenham sido encontradas mais do que estas "n"

folhas em outros conjuntos. Para o cálculo do CV foram utilizadas as áreas das "n" primeiras folhas de cada IFOV.

A DAF também foi determinada para cada IFOV, levando-se em consideração o ângulo de inclinação das folhas das mudas utilizadas no cálculo do IAF. Assim, de uma mesma folha, foram medidos a largura, o comprimento e o ângulo de inclinação em relação à horizontal. Esta última operação foi realizada com o auxílio de um clinômetro de bolso posicionado com uma de suas faces de referência mantida paralela à folha, evitando-se tocá-la para não alterar sua orientação natural. A Figura 3.6 mostra um esquema desta operação.

FIGURA 3.6 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS FOLHAS



Foram definidas 9 classes de ângulos de inclinação, as quais encontram-se apresentadas na Tabela 3.3. Para cada uma destas classes foi determinada a frequência relativa dos ângulos de inclinação das folhas coletados em campo.

TABELA 3.3. - CLASSES ANGULARES DA DAF

Amplitude angular	Centro da Classe	Classe
0-10	5	1
10-20	15	2
20-30	25	3
30-40	35	4
40-50	45	5
50-60	55	6
60-70	65	7
70-80	75	8
80-90	85	9

O número de classes adotado justifica-se pela forma de entrada dos dados nos programas SAIL e CANOPY que exigem este número de classes para a DAF.

Com o objetivo de conhecer qual o tipo de DAF dos dosséis em questão, foram determinadas as DAFs representativas dos dosséis de Eucalipto e de Peroba considerando os dados coletados de todos os seus respectivos IFOVs indistintamente. As frequências acumuladas foram traduzidas na forma gráfica, tendo-se como eixo das abscissas as 9 classes da DAF e no eixo das ordenadas, os valores das frequências acumuladas. A forma das curvas serviu como parâmetro na identificação do tipo de DAF dos dosséis, segundo orientações de BUNNIK (1978) e GOEL e STREBEL (1984).

Para o dossel de Eucalipto + Peroba, foram caracterizadas as DAFs das camadas 1 e 2 e a DAF de ambas as

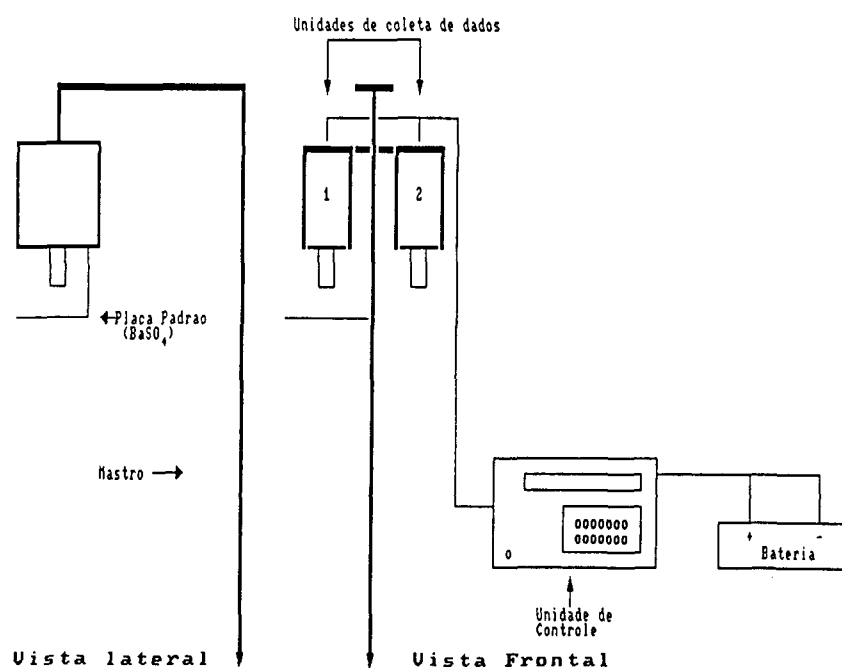


camadas como se a distinção em camadas não existisse. Este procedimento foi necessário diante da consideração deste dossel como sendo constituído por uma única camada, uma vez que seus dados foram também submetidos ao processamento do programa SAIL (uma camada).

### 3.3.1.3 Coleta de dados radiométricos

Esta etapa foi realizada através da utilização de um radiômetro SPECTRON SE-590 com a configuração ilustrada na Figura 3.7.

FIGURA 3.7 CONFIGURAÇÃO DO SPECTRON SE-590



O equipamento em questão é composto de 2 unidades de coleta de dados radiométricos, e uma unidade de controle e gravação, na qual é adaptada uma bateria para suprimento de energia elétrica.

A sensibilidade espectral deste equipamento é compreendida entre  $0,368\mu\text{m}$  a  $1,113\mu\text{m}$  e cada medida resulta num espectro composto por 256 bandas com aproximadamente  $0,003\mu\text{m}$  de largura. Os valores registrados são gravados em fita magnética para posterior processamento.

Primeiramente foram demarcados, ao lado dos canteiros, os pontos eqüidistantes de 1 m sobre os quais o mastro, contendo as unidades sensoras do equipamento, foi posicionado para a coleta e registro dos sinais espectrorradiométricos provenientes do dossel e da placa de sulfato de bário utilizada como referência.

A altura compreendida entre as unidades sensoras e o topo do dossel foi de aproximadamente 1,50 m para o dossel de Eucalipto e de 1,75 m para o dossel de Peroba. Estas alturas, e ângulos zenitais de visada originaram as dimensões de IFOVs apresentadas na Tabela 3.4.

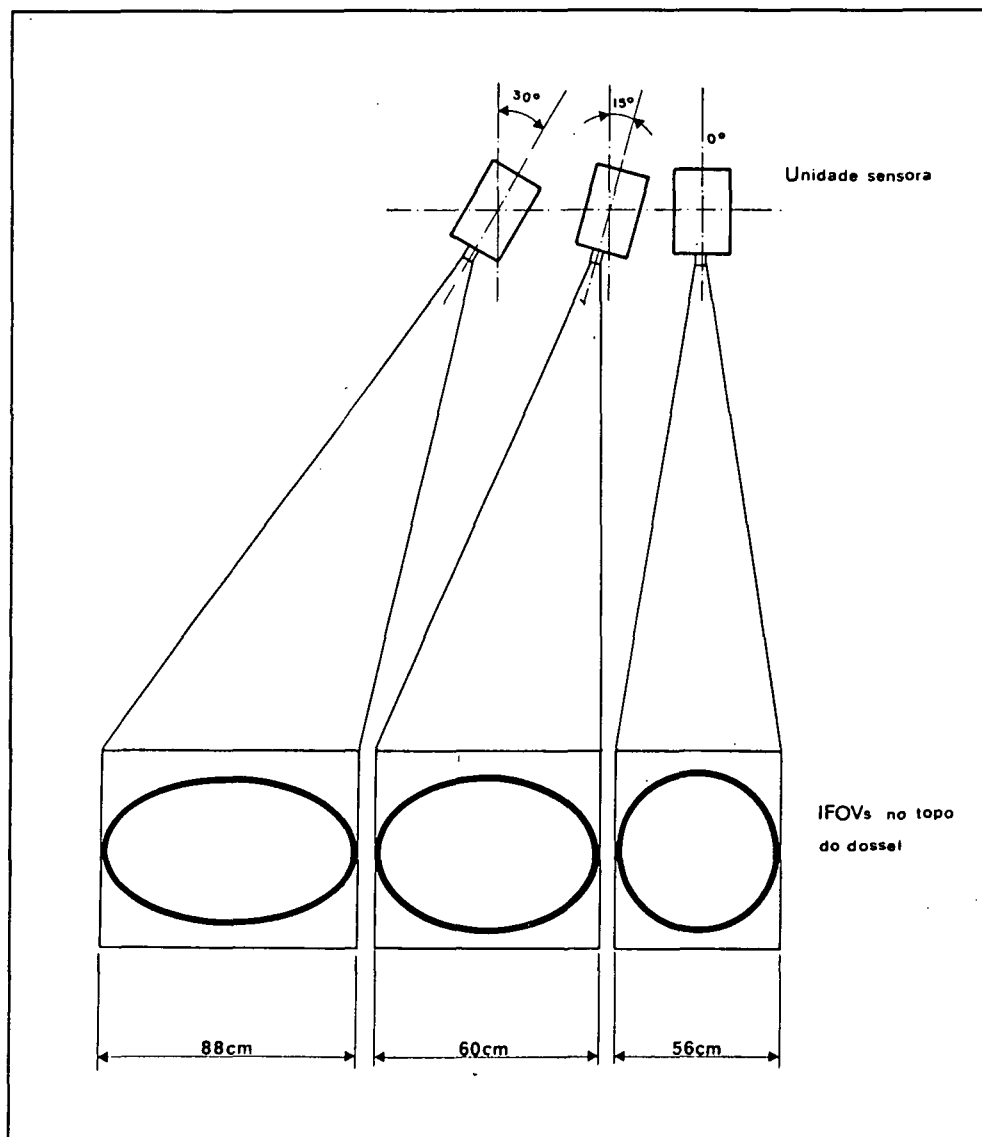
TABELA 3.4 DIMENSÕES DOS IFOVs NOS TOPOS DOS DOSSÉIS DE EUCALIPTO E DE PEROBA

	$\theta_v = 0^\circ$	$\theta_v = 15^\circ$	$\theta_v = 30^\circ$
Eucalipto	56cm	*60cm	*88cm
Peroba	58cm	*65cm	*90cm
Forma	Circular	Elíptica	Elíptica

\* tamanho da maior extensão

A Figura 3.8 ilustra esquematicamente estes IFOVs descritos, para o caso do dossel de Eucalipto.

FIGURA 3.8 DIMENSÕES DOS IFOVs NO TOPO DO DOSSEL DE EUCALIPTO



As medidas radiométricas foram então realizadas ponto a ponto procurando cobrir todos os pontos estabelecidos por dossel no menor período de tempo possível para minimizar as variações geométricas de iluminação entre a medida do primeiro ponto e a medida do último ponto. Em cada sequência de medidas, o ângulo zenital de visada ( $\theta_v$ ) foi mantido constante, o que constituiu a chamada "bateria de medidas".

No início de cada bateria eram feitas as leituras da placa padrão de sulfato de bário com ambas as unidades sensoras do radiômetro para fins de intercalibração. Em seguida eram coletados os sinais radiométricos provindos do primeiro ponto do dossel; na sequência era feita uma nova leitura da placa padrão, agora somente por uma das unidades sensoras (unidade 1) e ainda, esta mesma placa era sombreada com o auxílio de uma prancheta de acrílico envolta em um tecido de coloração preta, seguindo-se sua leitura pela mesma unidade sensora. Esta última leitura teve como objetivo registrar os dados necessários para o cálculo da fração de irradiância difusa (SKYL). O mastro era então posicionado no ponto seguinte, sendo repetidas as mesmas operações, com exceção das leituras para a intercalibração.

Ao final de cada bateria de medidas, o ângulo  $\theta_v$  era alterado e dava-se início a outra bateria tendo agora como ponto inicial o último ponto da bateria anterior. Foram considerados os ângulos  $\theta_v$  de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$ , os quais eram conseguidos através de um dispositivo especialmente desenvolvido para este fim, o qual localizava-se no mastro, mais especificamente, no suporte de fixação das unidades sensoras.

As medições radiométricas foram realizadas em diversos horários do dia, predominantemente na parte da manhã, procurando explorar as condições atmosféricas mais propícias para a coleta de dados dessa natureza. A Tabela 3.5 contém os horários nos quais foram realizadas as medições radiométricas em cada IFOV de cada dossel, bem como o valor de  $\theta_v$  adotado.

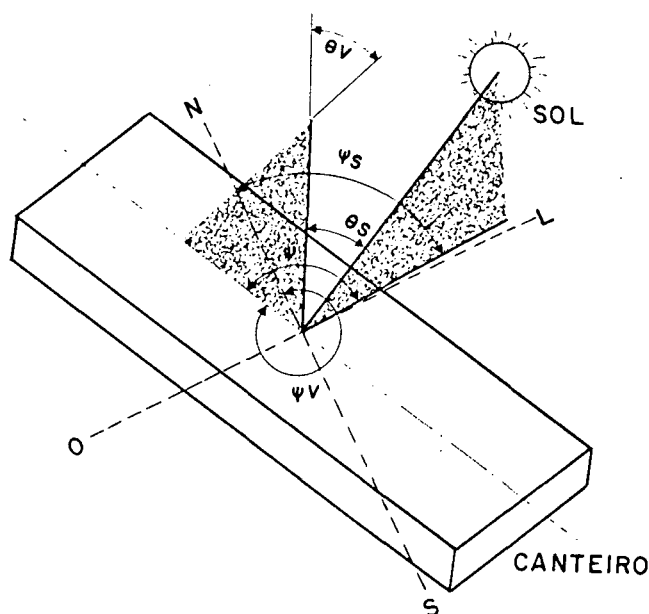
TABELA 3.5 HORÁRIOS DE REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES RADIOMÉTRICAS

DOSSEL	IFOV	0°	15°	30°	0°	15°	0°	15°		
	DIAS==>	12/04	12/04	12/04	12/04	12/04	12/04	12/04		
EUCALIPTO	1	08:06:49	08:36:28	08:51:29	09:50:46	10:10:06	12:36:54	12:58:33		
	2	08:08:03	08:35:58	08:51:10	09:51:05	10:09:45	12:37:15	12:58:06		
	3	08:08:45	08:35:35	08:50:48	09:52:28	10:09:25	12:38:33	12:57:39		
	4	08:09:23	08:35:12	08:50:10	09:52:47	10:08:37	12:38:59	12:57:23		
	5	08:10:29	08:34:41	08:49:34	09:53:10	10:08:03	12:39:25	12:56:57		
	6	08:10:58	08:33:47	08:49:07	09:53:41	10:07:41	12:39:43	12:56:40		
	7	08:11:43	08:33:22	08:48:27	09:53:59	10:07:19	12:40:02	12:56:23		
	8	08:12:11	08:32:56	08:48:06	09:54:18	10:06:39	12:40:27	12:55:63		
	9	08:12:37	08:32:30	08:47:22	09:54:36	10:06:09	12:42:12	12:55:38		
	10	08:13:03	08:31:58	08:46:58	09:54:56	10:05:48	12:42:37	12:54:21		
	11	08:13:59	08:31:34	08:46:21	09:55:46	10:05:19	12:42:58	12:53:59		
	12	08:14:26	08:31:12	08:46:00	09:56:06	10:04:59	12:43:27	12:53:36		
	13	08:14:56	08:30:06	08:45:32	09:56:29	10:04:10	12:43:47	12:52:05		
	14	08:15:54	08:29:21	08:45:13	09:56:59	10:03:50	12:44:08	12:51:46		
	15	08:16:24	08:28:52	08:44:25	09:57:23	10:03:19	12:44:42	12:51:26		
	16	08:17:08	08:28:25	08:43:45	09:57:53	10:02:59	12:45:01	12:50:52		
	17	08:18:14	08:27:39	08:43:23	09:58:27	10:02:13	12:45:22	12:49:33		
	18	08:18:47	08:27:09	08:42:47	09:59:08	10:01:49	12:45:43	12:49:16		
	19	08:19:18	08:26:38	08:42:14	09:59:34	10:01:13	12:46:02	12:48:58		
	20	08:19:44	08:25:38	08:41:11	10:00:06	10:00:32	12:46:30	12:48:30		
		0°	0°	15°	30°	15°	30°	0°	15°	30°
	DIAS==>	11/04	12/04	11/04	11/04	12/04	12/04	12/04	12/04	12/04
PEROBA	1	08:17:33	09:13:23	09:17:16	09:20:00	09:23:29	09:24:10	14:17:00	14:18:22	15:17:39
	2	08:19:13	09:14:50	09:15:41	09:21:00	09:23:16	09:25:39	14:16:19	14:18:48	15:17:03
	3	08:20:13	09:15:26	09:14:59	09:22:39	09:22:50	09:26:01	14:14:39	14:19:28	15:16:28
	4	08:20:58	09:16:10	09:13:41	09:23:37	09:22:07	09:27:27	14:14:14	14:19:58	15:15:53
	5	08:21:46	09:17:01	09:12:45	09:24:23	09:21:23	09:29:08	14:13:31	14:20:22	15:15:16
	6	08:23:14	09:17:31	09:11:48	09:25:05	09:21:04	09:30:05	14:13:01	14:21:04	15:14:46
	7	08:26:31	09:18:05	09:10:52		09:20:31	09:30:27	14:12:24	14:21:28	15:13:56
	8		09:18:34	09:09:21		09:20:03	09:31:15	14:10:06	14:22:15	
		0°	15°	30°	0°	15°	30°			
	DIAS==>	14/04	14/04	14/04	15/04	15/04	15/04			
PEROBA + EUCALIPTO	1	10:30:40	10:39:49	10:40:42	08:43:10	08:51:18	08:51:52			
	2	10:32:00	10:39:20	10:41:32	08:44:06	08:50:51	08:52:26			
	3	10:32:25	10:38:32	10:42:35	08:44:31	08:50:24	08:52:56			
	4	10:32:51	10:37:28	10:43:09	08:45:04	08:49:53	08:53:39			
	5	10:33:19	10:37:11	10:43:47	08:45:31	08:49:30	08:54:19			
	6	10:33:52	10:36:53	10:44:16	08:45:52	08:49:05	08:54:44			
	7	10:34:32	10:36:19	10:44:46	08:46:27	08:48:34	08:55:13			
	8	10:35:04	10:36:00	10:45:20	08:47:05	08:48:08	08:55:38			

Dada a predominância de coleta de dados no período matutino, decidiu-se pela inclinação de  $\theta_v$  paralelamente ao eixo longitudinal dos canteiros, com a unidade sensora, responsável pela coleta dos dados provenientes do dossel, apontada para o lado contrário ao do Sol.

A Figura 3.9 ilustra o sentido de inclinação adotado para  $\theta_v$ , e os demais ângulos que caracterizaram a geometria de iluminação segundo a orientação dos canteiros no terreno.

FIGURA 3.9 ÂNGULOS QUE CARACTERIZARAM AS GEOMETRIAS DE ILUMINAÇÃO E DE VISADA, SEGUNDO A ORIENTAÇÃO ESPACIAL DOS CANTEIROS NO TERRENO



### 3.3.2 Determinação de $\rho$ , $\tau$ e $\rho_s$

Os valores de reflectância ( $\rho$ ) e transmitância ( $\tau$ ) hemisféricas das folhas e da reflectância hemisférica do solo ( $\rho_s$ ) foram determinados através do uso de uma esfera

integradora (LICOR), cuja sensibilidade espectral está compreendida entre  $0,4\mu\text{m}$  a  $1,1\mu\text{m}$ , com uma resolução de  $0,01\mu\text{m}$ .

Foram selecionadas algumas mudas de ambas as espécies, a quais foram levadas às dependências do CEPAGRI, em Campinas SP, para que fossem feitas as medidas radiométricas de algumas de suas folhas. Foram utilizadas 4 mudas das quais foi considerada uma folha de cada. Dos vetores resultantes foi calculada a média aritmética de seus elementos originando um único vetor representativo de  $\rho$  e outro de  $\tau$  da espécie.

As folhas não foram arrancadas das mudas sendo, então, medidas radiometricamente "in vivo". Foram determinadas as reflectância e transmitância hemisféricas da face ventral, uma vez que esta face apresenta uma maior interação com a radiação eletromagnética incidente.

Foram determinados também vetores médios da reflectância e da transmitância hemisféricas das folhas de Eucalipto e Peroba, originando dois outros vetores que representaram o que poderia ser chamado de reflectância e transmitância médias das folhas de ambas as espécies. Estes vetores foram utilizados no processamento do programa SAIL.

Para as amostras de solo a serem medidas radiometricamente, foram coletados, aproximadamente, 2kg do solo utilizado no enchimento dos recipientes destinados ao plantio das mudas. Este material foi homogeneizado manualmente e parte dele foi colocado dentro de 6 recipientes metálicos medindo aproximadamente 4,5 cm de diâmetro por 0,7 cm de espessura. O material contido em três destes recipientes foi umedecido, enquanto que aquele contido nos demais recipientes

foi mantido inalterado (umidade ambiente). Todos estes recipientes foram então envoltos por uma membrana plástica translúcida para impedir que partículas de solo adentrassem no interior da esfera integradora.

Para os vetores resultantes das medições radiométricas foram determinadas médias para as diferentes condições de umidade (umidade ambiente e úmido); os dados foram gravados em disco flexível (disquete de 5 1/4") no formato ASCII para uso posterior.

### 3.3.3 Geometria de iluminação

Os ângulos zenital solar ( $\theta_s$ ) e azimutal solar ( $\psi_s$ ) foram determinados através de um programa computacional, em linguagem BASIC, que leva em consideração a latitude e a longitude locais, o horário local, a hora sideral, a ascensão reta e a declinação do Sol; sendo estes três últimos parâmetros encontrados no Anuário Astronômico do Instituto de Astrofísica da Universidade Estadual de São Paulo, em função do dia do mês. A latitude e a longitude da Fazenda Rio Claro foram determinadas com o auxílio de uma carta ao milionésimo, enquanto que o horário local foi automaticamente registrado pelo radiômetro SPECTRON SE-590 durante todas as medições radiométricas. Uma vez com todos estes dados à disposição, determinou-se  $\theta_s$  e  $\psi_s$  para cada vetor obtido.

### 3.4 ORGANIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS COLETADOS E CALCULADOS

Por dados coletados compreenderam-se aqueles biofísicos e os radiométricos dos dosséis e de folhas isoladas, os quais



foram adquiridos na etapa experimental de campo e laboratório, respectivamente; enquanto os dados calculados se referem aos resultados do processamento dos programas SAIL e CANOPY.

Diante do grande número de dados, de sua diversidade quanto à natureza e das formas de sua utilização, optou-se pelos seus registros em planilhas especialmente elaboradas e em arquivos de dados em formato ASCII por ser este formato de aceitação quase universal quando da utilização de aplicativos e outros programas computacionais.

#### 3.4.1 Registro e processamento dos dados coletados

A idéia principal que norteou o registro dos dados coletados fundamentou-se no fato de que cada ponto do dossel medido radiometricamente (IFOV) constituiu uma fonte de dados que foram submetidos ao processamento dos programas mencionados, que resultou em novos dados passíveis de análise. Assim, o registro de dados deu-se por IFOV de forma a facilitar seu manuseio e análise, sendo elaborado um conjunto de planilhas para cada IFOV, conjunto este composto por uma planilha na qual foram registrados os dados biofísicos e outras que continham os dados referentes às geometrias de iluminação e visada de cada medição radiométrica e das frações SKYL para cada comprimento de onda no intervalo considerado (vide item 3.2).

Como mencionado anteriormente, os dados radiométricos foram registrados em fita magnética. Estes dados foram então submetidos ao processamento do programa ESPECTRO, desenvolvido pelo LARAD/INPE, para o cálculo dos valores de reflectância

dos IFOVs, que serão tratados de agora em diante como valores medidos de reflectância (VMR).

Primeiramente foram determinados os fatores de intercalibração, que foram utilizados para corrigir possíveis diferenças entre as sensibilidades espectrais das unidades sensoras do radiômetro. Para tanto foram utilizados os dados radiométricos referentes às leituras da placa de referência, sendo que os vetores resultantes das leituras da unidade 1 (que foi utilizada para coletar os dados provenientes dos dosséis) foram divididos pelos vetores resultantes das leituras da outra unidade (unidade 2). Os produtos dessa divisão foram denominados fatores de intercalibração (FI).

Em seguida foi realizado o procedimento de calibração dos vetores que consistiu na divisão dos elementos destes vetores referentes aos dados provenientes dos dosséis, pelos elementos dos vetores referentes à placa de referência. Aqui foi considerado o período de tempo entre a obtenção de ambos os vetores (dossel e placa), de forma que a divisão ocorreu entre aqueles mais próximos temporalmente. Os resultados dessas divisões foram multiplicados pelos FIs, obtendo-se como resultado os valores de reflectância para cada IFOV e horário de realização da medição radiométrica, que estava associado às geometrias de iluminação e visada.

Uma vez que a placa de referência apresentava sinais de deterioração, procedeu-se ao cálculo dos fatores de calibração (FC) desta, utilizando uma placa padrão de referência desenvolvida pelo LARAD/INPE, e aquela utilizada durante as medições de campo. Este procedimento foi conduzido no próprio

LARAD/INPE, dividindo-se a leitura espectral feita sobre a placa trazida do campo pela leitura da placa padrão. Estes fatores foram então multiplicados aos valores de reflectância mencionados, o que resultou nos VMRs, que foram gravados em disquetes de 5 1/4" em formato ASCII para posterior uso em programas computacionais.

Foram identificadas as posições (colunas) de cada VMR existente dentro de cada arquivo ASCII de forma a facilitar sua associação com o IFOV e horário de medição e seu processamento em programas computacionais cujos objetivos serão apresentados oportunamente.

As frações SKYL foram determinadas segundo o mesmo procedimento descrito para o cálculo dos VMRs, considerando as leituras realizadas pela unidade 1 da placa sombreada como leituras provenientes de um alvo, assim como o foram aquelas provenientes dos dosséis. Aqui também foram considerados os fatores de calibração da placa de referência que, multiplicados aos vetores SKYL, resultaram em novos vetores que foram também gravados em formato ASCII e identificados semelhantemente aos VMRs. Os valores percentuais da fração SKYL representaram a interferência da atmosfera sobre a incidência da REM na superfície terrestre.

Os vetores referentes à reflectância, à transmitância hemisféricas das folhas e à reflectância hemisférica do solo, foram calculados concomitantemente às medições radiométricas realizadas em campo. Cada leitura amostral (de qualquer um destes elementos) resultou num vetor que, como já mencionado, estava compreendido entre  $0,40\mu\text{m}$  e  $1,10\mu\text{m}$ , em intervalos de

0,01 $\mu$ m. Esta resolução espectral definiu aquela adotada em todo o trabalho com o objetivo de uniformizar o conteúdo de dados dos vetores, permitindo assim comparações a cada intervalo de comprimento de onda.

A amplitude dos valores dos elementos dos vetores foi reduzida para 0,40 $\mu$ m a 0,90 $\mu$ m, sendo o limite superior definido em função de uma interferência inerente ao equipamento (Spectron SE-590), denominada de efeito harmônico, que se refere a uma reprodução da sensibilidade espectral na região do azul sobre a região do infravermelho, mais evidente após 0,90 $\mu$ m, constituindo sinais indesejáveis. Sendo assim, os vetores VMRs e SKYLs foram reduzidos para esse novo intervalo e resolução, e ambos foram gravados em formato ASCII, sendo os SKYLs copiados manualmente nas planilhas já mencionadas.

Como não se dispunha de leituras da fração SKYL para cada IFOV em todos os horários de medição, optou-se pela adoção do mesmo critério temporal adotado na calibração dos dados para o cálculo dos VMRs, ou seja, cada IFOV em cada horário recebeu como vetor SKYL aquele adquirido num horário mais próximo ao da medição radiométrica.

#### 3.4.2 Elaboração e processamento dos arquivos de dados

Os dados existentes nas planilhas foram então gravados em arquivos no formato ASCII segundo a formatação de leitura de dados dos programas SAIL e CANOPY. Os VMRs, SKYLs,  $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$  foram transformados em vetores com 51 posições, cada uma delas relativa a um comprimento de onda compreendido no intervalo de 0,4 $\mu$ m a 0,9 $\mu$ m. Foram compostos tantos arquivos

quanto o número de IFOVs e situações de iluminação e visada (horários).

Uma vez concluída esta etapa de elaboração destes arquivos, estes foram submetidos aos processamentos dos programas SAIL e CANOPY que resultaram em novos arquivos de dados agora compostos essencialmente pelos valores calculados de reflectância (VCR).

#### 3.4.3 Pareamento de vetores (VMRs x VCRs)

Ao final do processamento dos programas, cada VMR registrado teve seu respectivo VCR para as mesmas condições de iluminação e visada e estrutura do dossel.

Para facilitar a visualização e a análise de diferenças entre dois vetores correspondentes e assim poder avaliar o desempenho do modelo nas diversas situações, fez-se necessário o chamado pareamento dos vetores que consistiu na elaboração de novos arquivos contendo pares de vetores constituídos pelos VMRs e VCRs correspondentes. Para tanto foi elaborado um programa computacional em linguagem FORTRAN 77, compatível com um microcomputador da linha PC-XT que buscava os vetores VMR e VCR em seus respectivos arquivos mediante o fornecimento de suas identificações (posições em número de colunas). Estes vetores eram então posicionados dentro de um novo arquivo conforme sua ordem de leitura. Supondo, por exemplo, a necessidade de se reunir num único arquivo todos os VMRs e seus respectivos VCRs medidos e calculados para um único IFOV. Neste caso bastaria fornecer ao programa os nomes dos arquivos e as posições assumidas por esses vetores dentro destes

arquivos; o pareamento se daria pela ordem desse fornecimento.

O pareamento deu-se por horário, ou seja, num único arquivo constaram os vetores medidos e calculados em diferentes horários provenientes de diferentes IFOVs, para um mesmo dossel. A Tabela 3.6 mostra um esquema de como foram concebidos os arquivos contendo os vetores pareados.

TABELA 3.6 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ARQUIVOS DOS VETORES PAREADOS

HORARIO 1				
	IFOV 1	IFOV 2	IFOV 3	IFOV n
$\lambda(\mu\text{m})$	Medido	Medido	Medido	Medido
0,40	UMR1	UMR1	UMR1	UMR1
0,41	UMR2	UMR2	UMR2	UMR2
0,42	UMR3	UMR3	UMR3	UMR3
0,43	UMR4	UMR4	UMR4	UMR4
0,44	UMR5	UMR5	UMR5	UMR5
0,45	UMR6	UMR6	UMR6	UMR6
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
0,90	UMR51	UMR51	UMR51	UMR51
	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado
0,40	UCR1	UCR1	UCR1	UCR1
0,41	UCR2	UCR2	UCR2	UCR2
0,42	UCR3	UCR3	UCR3	UCR3
0,43	UCR4	UCR4	UCR4	UCR4
0,44	UCR5	UCR5	UCR5	UCR5
0,45	UCR6	UCR6	UCR6	UCR6
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
0,90	UCR51	UCR51	UCR51	UCR51

A concepção destes arquivos teve como objetivo extrair informações sobre a reflectância espectral direcional provinda dos dosséis, nas diferentes situações de iluminação e visada, bem como conhecer e/ou avaliar o desempenho do modelo e de suas versões disponíveis para estas mesmas situações.

### 3.5 CRITÉRIOS E PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DOS VETORES PAREADOS

Para cada dossel foram constituídos tantos arquivos quanto o número de horários considerados para a realização das medições radiométricas, e cada um destes arquivos incluiu tantos pares de vetores VMRs e VCRs quanto o número de IFOVs. Foram então determinados os chamados VMRs e VCRs médios, resultantes da média aritmética entre os vetores de cada IFOV que passaram a representar os resultados de um dado horário. Foram ainda determinados os Coeficientes de Variação (CVs) destes VMRs e VCRs médios para cada comprimento de onda. No caso dos CVs dos VMRs, estes foram utilizados para a identificação da homogeneidade e/ou heterogeneidade entre as medidas radiométricas realizadas em cada IFOV em um determinado horário. Uma vez que estes CVs foram determinados para cada comprimento de onda, foi possível identificar as regiões espectrais nas quais os VMRs apresentaram maior variação entre as medidas, possibilitando ainda inferir sobre as possíveis causas dessa variação.

A comparação entre os VMRs e VCRs levou em consideração as bandas espectrais apresentadas no item 3.2, de forma a avaliar o desempenho do modelo em cada uma delas, nas diversas situações de visada, iluminação e de disposição dos dosséis.

O parâmetro utilizado para avaliar o ajuste entre os valores medidos e os calculados foi o RQMP que foi calculado através da seguinte equação:

$$RQMP = 1/\sum \left[ (VMR - VCR)^2 / N \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

onde: N= número de observações;

Sm= desvio padrão de VMR.

Aqui o valor de N foi dependente do número de comprimentos de onda existente em cada banda mencionada.

Assim:

Banda 1 ==> N=8

Banda 2 ==> N=9

Banda 3 ==> N=7

Banda 4 ==> N=15

Com o objetivo de facilitar a compreensão do desempenho do modelo ao longo de todo o espectro considerado, foram determinadas as diferenças percentuais entre os VMRs e VCRs através da seguinte equação:

$$D = 100 * (VMR_i - VCR_i) / VMR_i \quad (3.5)$$

onde: D = erro em % ;

$VMR_i$  = valor medido de reflectância no iésimo comprimento de onda;

$VCR_i$  = valor calculado de reflectância no iésimo comprimento de onda.

Como resultado da análise dos valores de RQMP, foram identificados os melhores e piores desempenhos do modelo, nas duas versões (SAIL e CANOPY), considerando as condições de realização do experimento de campo.

### 3.6 INVERSÃO DO MODELO

O procedimento de inversão do modelo teve início considerando-se primeiramente os resultados alcançados no cálculo de RQMP de cada banda, para os três dosséis considerados. Foram selecionados os horários nos quais o



modelo obteve os melhores e piores desempenhos por banda espectral. A função mérito  $F$  foi definida como a diferença quadrática entre VMR e VCR e que foi então minimizada para cada banda considerando duas situações bastantes distintas em termos de desempenho do modelo, com o objetivo de avaliar as estimativas obtidas de IAF nestas duas situações, em cada banda espectral.

Para a minimização da função  $F$  foi utilizado um método proposto por NELDER e NEAD (1965), usando uma subrotina baseada no algoritmo proposto por O'NEILL (1971), apud YANASSE (1991). Esta, operacionalmente consiste na atribuição de um valor inicial ao parâmetro ou parâmetros que se deseja estimar, seguindo-se iterações buscando a minimização de  $F$  através do cálculo de  $VCR_i$  via modelo. Aqui o valor de  $N$  (Equação 3.4) foi dependente da amplitude das bandas espectrais consideradas.

A minimização de  $F$  e conseqüente estimativa de IAF foi realizada para cada dossel nos horários de melhor e pior desempenhos. Os valores dos parâmetros de entrada do modelo que foram mantidos fixos ( $DAF$ ,  $SKYL$ ,  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\rho_s$ ,  $\theta_s$ ,  $\psi_s$ ,  $\theta_v$  e  $\psi_v$ ) foram definidos adotando-se aqueles relativos ao primeiro IFOV de cada dossel, para as condições que proporcionaram os piores e melhores desempenhos. Os valores do  $VMR_i$  foram aqueles médios relativos aos horários em questão para cada banda.

Uma vez que se desconhecia a existência de um único valor mínimo para  $F$  em cada situação, optou-se em determinar este valor mínimo para 6 valores iniciais de IAF, permitindo

assim avaliar os resultados encontrados. Estes valores iniciais foram: IAF= 0,5, 3, 5, 8, 10 e 15.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

#### 4.1.1 Índice de Área Foliar (IAF)

Na Tabela 4.1 encontram-se as médias de reflectância das quatro bandas consideradas, para os valores de IAF, nas duas situações de iluminação (manhã e tarde) e três ângulos zenitais de visada ( $\theta_v = 0^\circ, 15^\circ$  e  $30^\circ$ ), assim como os resultantes PVs e CVs.

A análise dos dados contidos nesta tabela permitiu observar que para as bandas referentes à região do visível (bandas 1, 2 e 3), os valores das médias de reflectância foram decrescentes com o aumento dos valores de IAF, o que indicou um resultado coerente com o processo de interação entre a radiação eletromagnética (REM) e a vegetação, nessa região espectral, devido à absorção da REM por parte dos pigmentos (KUMAR, 1972 e TUCKER, 1977).

Observou-se ainda que as diferenças entre as médias foram maiores entre os IAFs de menor valor, o que também representou um resultado coerente devido à aproximação do ponto de saturação indicado por TUCKER (1977) e KUMAR (1972) como sendo em torno de IAF igual a 2 ou 3, a partir do qual não são mais detectadas alterações na reflectância de um dossel para a região do visível.

TABELA 4.1 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DOS DOSSÉIS PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE IAF

VALORES DE IAF											
Banda	$\Theta_v$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	PV(%) 800,00	CV(%) 50,00
Manhã - $\Theta_s = 65^\circ, \psi_s = 68^\circ$											
1	$0^\circ$	5,150	3,655	3,060	2,826	2,734	2,695	2,683	2,675	48,058	25,274
2	$0^\circ$	8,108	6,696	6,088	5,828	5,718	5,668	5,649	5,641	30,423	13,011
3	$0^\circ$	8,760	5,459	4,109	3,557	3,331	3,241	3,206	3,189	63,601	41,611
4	$0^\circ$	30,845	39,370	45,786	50,731	54,613	57,697	60,181	62,196	101,639	20,310
1	$15^\circ$	5,148	3,649	3,058	2,819	2,726	2,693	2,675	2,671	48,106	25,340
2	$15^\circ$	8,102	6,687	6,081	5,819	5,709	5,664	5,641	5,633	30,472	13,032
3	$15^\circ$	8,756	5,453	4,103	3,551	3,329	3,237	3,199	3,184	63,632	41,661
4	$15^\circ$	30,821	39,337	45,753	50,696	54,574	57,660	60,143	62,159	101,681	20,316
1	$30^\circ$	5,144	3,646	3,053	2,818	2,725	2,685	2,673	2,666	48,165	25,371
2	$30^\circ$	8,099	6,680	6,073	5,812	5,702	5,654	5,634	5,626	30,539	13,069
3	$30^\circ$	8,753	5,449	4,099	3,547	3,321	3,230	3,194	3,179	63,685	41,732
4	$30^\circ$	30,798	39,304	45,716	50,658	54,536	57,620	60,103	62,119	101,701	20,321
Tarde - $\Theta_s = 34^\circ, \psi_s = 333^\circ$											
1	$0^\circ$	5,196	3,690	3,081	2,834	2,735	2,695	2,680	2,671	48,593	25,679
2	$0^\circ$	8,127	6,692	6,063	5,789	5,669	5,619	5,598	5,586	31,269	13,468
3	$0^\circ$	8,869	5,536	4,146	3,564	3,324	3,223	3,181	3,164	64,320	42,424
4	$0^\circ$	30,479	38,853	45,231	50,188	54,106	57,238	59,768	61,829	102,854	20,515
1	$15^\circ$	5,214	3,711	3,106	2,863	2,763	2,721	2,706	2,700	48,214	25,372
2	$15^\circ$	8,163	6,740	6,118	5,846	5,729	5,677	5,654	5,646	30,843	13,234
3	$15^\circ$	8,890	5,567	4,180	3,600	3,359	3,259	3,217	3,199	64,021	42,008
4	$15^\circ$	30,658	39,101	45,507	50,477	54,399	57,532	60,064	62,125	102,638	20,473
1	$30^\circ$	5,231	3,740	3,138	2,891	2,795	2,755	2,739	2,734	47,742	24,991
2	$30^\circ$	8,200	6,794	6,180	5,910	5,791	5,741	5,721	5,711	30,352	12,960
3	$30^\circ$	8,914	5,601	4,217	3,643	3,399	3,301	3,261	3,243	63,622	41,502
4	$30^\circ$	30,865	39,391	45,828	50,811	54,736	57,873	60,404	62,465	102,381	20,423

Para a banda referente à região do infravermelho próximo (banda 4), os valores foram crescentes ao longo de todo o intervalo de IAFs considerado (IAF= 0,5 a IAF= 4,0), indicando aqui também uma coerência com os resultados apontados pelos autores supra mencionados.

Constatou-se ainda que, para o horário da manhã, com aumento do valor de  $\Theta_v$  verificou-se uma tendência à diminuição dos valores das médias para um mesmo IAF, em todas as bandas.

Já para o horário da tarde, este resultado foi exatamente contrário, com o aumento dos valores das médias para um mesmo IAF, em todas as bandas. Estes resultados foram contrários às observações de RANSON et al. (1986) e JACKSON et al. (1979), referentes à posição relativa entre o sensor e o Sol.

No horário da manhã, o Sol encontrava-se posicionado quase que perpendicularmente à direção de visada, enquanto que na parte da tarde este ficou posicionado praticamente na mesma direção, mas com seus raios incidindo no sentido contrário ao sentido de visada (sentido oposto ao de retroespalhamento). Nestas condições a dinâmica dos valores de reflectância do dossel deveria ser exatamente contrária a que foi observada. Isto pode ser explicado pelo fato de que o modelo não considera o efeito das sombras sobre a reflectância espectral dos dosséis.

Na Tabela 4.1, a coluna intitulada Percentagem de Variação (PV) indica a variação observada entre as médias, para cada banda, dentro do intervalo de IAF de 0,5 a 4,0.

A interpretação destes dados percentuais pode ser exemplificada por: considerando  $\theta_v = 0^\circ$ , período da manhã e banda 1, tem-se que para uma variação de 800% no valor do IAF (IAF= 0,5 a IAF= 4,0) foi encontrada uma variação de 48,058% (variando de 2,683 a 5,150) nos valores das médias referentes a esta banda. Ainda, para esta mesma situação, tem-se que para um CV do IAF igual a 50,0%, foi encontrado um CV igual a 25,27% para as médias da banda 1. Como outro exemplo, pode ser analisada a mesma situação de visada ( $\theta_v = 0^\circ$ ), período da manhã e banda 4. Para uma variação de 800% nos valores dos IAFs

(IAF= 0,5 a IAF= 4,0) foi determinada uma variação de 101,639% nos valores das médias da banda 4. A mesma comparação pode ainda ser feita entre os Coeficientes de Variação (CVs).

Estas tendências de diminuição dos valores das médias das bandas 1, 2 e 3 (bandas referentes à região espectral do visível) e de aumento dos valores das médias da banda 4 (região espectral do infravermelho próximo), com o aumento dos valores do IAF, foram coerentes com o processo de interação da REM com a vegetação. O aumento do IAF, e conseqüente diminuição da reflectância do dossel, na região do visível, é explicada pela presença de pigmentos fotossintetizantes (principalmente clorofila), os quais absorvem maior quantidade de REM.

Na região do infravermelho, o aumento da reflectância é ocasionado pelo aumento da probabilidade de desvios na trajetória da REM (KUMAR, 1972; TUCKER, 1977 e GATES et al., 1965).

#### 4.1.2 Distribuição Angular das Folhas (DAF)

Na Tabela 4.2 encontram-se as médias das bandas 1, 2, 3 e 4 para as simulações referentes às 7:00, 9:00, 11:00 e 13:00h, e para  $\theta_v$  de  $0^\circ$  e  $30^\circ$ , bem como os respectivos valores resultantes de PV e CVs, considerando um IAF de 0,5. Os cabeçalhos das colunas (Daf 15, Daf 18,...Daf 24), representam as DAFs cujo ângulo médio de inclinação das folhas foram iguais a  $15^\circ$ ,  $18^\circ$ ,... $24^\circ$ , respectivamente.

Conforme mencionado na seção 3.2, não foram calculadas as PV e CVs entre as DAFs consideradas por tratar-se de um parâmetro angular. Assim, a interpretação dos dados contidos

na Tabela 4.2 fundamentou-se nos seguintes quatro elementos:

1) PVs e CVs das médias das bandas; 2) nas geometrias de iluminação e de visada; 3) nas variações da própria DAF e 4) no processo de interação da REM com a vegetação.

TABELA 4.2 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES DAFs E IAF= 0,5

DAFs CONSIDERADAS					%		Banda	$\Theta_v$	Horário
Daf 15°	Daf 18°	Daf 20°	Daf 22°	Daf 24°	PV	CV			
5,0775	5,0025	4,9763	4,9063	4,8875	3,7420	1,3800	1	0°	7:00
8,2111	8,2367	8,2500	8,2533	8,2856	0,9066	0,2935	2	0°	7:00
8,5057	8,3514	8,2943	8,1500	8,1100	4,6523	1,7247	3	0°	7:00
32,8794	33,7969	34,1338	34,8144	35,2369	7,1701	2,3988	4	0°	7:00
5,1588	5,1700	5,1750	5,1875	5,1888	0,5815	0,2168	1	0°	9:00
8,1378	8,1222	8,1111	8,1000	8,0867	0,6281	0,2174	2	0°	9:00
8,7229	8,7786	8,8057	8,8629	8,8800	1,8015	0,6480	3	0°	9:00
31,2988	30,8813	30,6688	30,2738	30,1019	3,8240	1,3971	4	0°	9:00
5,1588	5,1700	5,1750	5,1875	5,1888	0,5815	0,2168	1	0°	11:00
8,1378	8,1222	8,1111	8,1000	8,0867	0,6281	0,2174	2	0°	11:00
8,7229	8,7786	8,8057	8,8629	8,8800	1,8015	0,6480	3	0°	11:00
31,2988	30,8813	30,6688	30,2738	30,1019	3,8240	1,3971	4	0°	11:00
5,1588	5,1700	5,1750	5,1875	5,1888	0,5815	0,2168	1	0°	13:00
8,1378	8,1222	8,1111	8,1000	8,0867	0,6281	0,2174	2	0°	13:00
8,7229	8,7786	8,8057	8,8629	8,8800	1,8015	0,6480	3	0°	13:00
31,2988	30,8813	30,6688	30,2738	30,1019	3,8240	1,3971	4	0°	13:00
5,0525	4,9750	4,9425	4,8675	4,8488	4,0327	1,5002	1	30°	7:00
8,1644	8,1844	8,1900	8,1911	8,2156	0,6260	0,1995	2	30°	7:00
8,4786	8,3171	8,2571	8,1086	8,0657	4,8694	1,8043	3	30°	7:00
32,6475	33,5238	33,8263	34,4925	34,8775	6,8305	2,2939	4	30°	7:00
5,1625	5,1738	5,1788	5,1925	5,1938	0,6053	0,2271	1	30°	9:00
8,1444	8,1300	8,1200	8,1122	8,1000	0,5457	0,1867	2	30°	9:00
8,7271	8,7843	8,8129	8,8700	8,8900	1,8661	0,6671	3	30°	9:00
31,3269	30,9219	30,7156	30,3338	30,1669	3,7029	1,3517	4	30°	9:00
5,1700	5,1850	5,1938	5,2113	5,2150	0,8704	0,3210	1	30°	11:00
8,1622	8,1556	8,1500	8,1489	8,1433	0,2314	0,0787	2	30°	11:00
8,7386	8,7986	8,8300	8,8971	8,9157	2,0271	0,7338	3	30°	11:00
31,4175	31,0581	30,8706	30,5294	30,3831	3,2924	1,2011	4	30°	11:00
5,1788	5,1975	5,2063	5,2275	5,2338	1,0620	0,3849	1	30°	13:00
8,1778	8,1789	8,1800	8,1822	8,1800	0,0272	0,0180	2	30°	13:00
8,7457	8,8129	8,8471	8,9171	8,9400	2,2215	0,7962	3	30°	13:00
31,4981	31,1775	31,0100	30,7056	30,5750	2,9307	1,0670	4	30°	13:00

Considerando inicialmente o ângulo  $\theta_v = 0^\circ$ , os quatro horários e as DAFs utilizadas, verificou-se, apenas no horário das 7:00h, que o aumento do ângulo de inclinação das folhas acarretou o aumento na reflectância do dossel nas bandas 2 e 4, e a diminuição desta reflectância nas bandas 1 e 3.

Em condições de iluminação mais oblíqua como esta deste horário, JACKSON et al. (1979) mencionaram que as folhas de todo o dossel tornam-se bem iluminadas, incluindo a camada ocupada pelo solo. Com o aumento do ângulo de inclinação das folhas, aquelas localizadas no interior do dossel e o solo tornaram-se mais visíveis por parte do sensor, o que implicou no aumento da reflectância do dossel tanto na região do visível quanto na região do infravermelho. Os autores não mencionaram contudo a densidade dos dosséis utilizados em seus experimentos.

Nas simulações, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 4.2, o IAF foi igual a 0,5, caracterizando o dossel como pouco denso, fazendo com que o solo influenciasse mais significativamente na reflectância do dossel.

Para os demais horários (9:00h, 11:00h e 13:00h) e ainda  $\theta_v = 0^\circ$ , verificou-se que o aumento do ângulo de inclinação das folhas acarretou a diminuição da reflectância nas bandas 2 e 4 e seu aumento nas bandas 1 e 3. Isto, aparentemente, não constituiu um resultado coerente com o processo de interação entre a REM e a vegetação, uma vez que à medida que o dossel vai se tornando mais erectófilo, a REM penetra em seu interior e é menos refletida, acarretando a diminuição da reflectância



do dossel em ambas as regiões espectrais (visível e infravermelho).

Os valores das médias foram exatamente os mesmos para os três horários mencionados, indicando que a geometria de iluminação não exerceu influência na determinação da reflectância do dossel nestas condições.

Para  $\theta_v = 30^\circ$  e horário das 7:00h, em relação ao mesmo horário e  $\theta_v = 0^\circ$ , verificou-se que para todos os ângulos de inclinação foliar e todas as bandas, os valores da reflectância diminuíram, indicando que o modelo assumiu que em condições de iluminação oblíqua e direção de visada diferente à do retroespalhamento, houve uma diminuição da reflectância do dossel. Este resultado concordou com aqueles obtidos por RANSON et al. (1986) para o caso de dosséis pouco densos.

Nos demais horários, ainda para  $\theta_v = 30^\circ$ , foi verificada a influência da geometria de iluminação no sentido de aumentar a reflectância do dossel com a diminuição de  $\theta_s$ , em todas as bandas. Este resultado concordou com aqueles encontrados por TUCKER (1977), JACKSON et al. (1979), RAO et al. (1979), PINTER et al. (1985) e RANSON et al. (1986).

Na Tabela 4.3 encontram-se as médias das reflectâncias referentes às quatro bandas espectrais para as simulações dos horários das 7:00h, 9:00h, 11:00h e 13:00h,  $\theta_v$  igual a  $0^\circ$  e  $30^\circ$  e ainda para IAF igual a 4,0; bem como os respectivos valores resultantes de PV e CV.

TABELA 4.3 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES DAFs E IAF=4,0

DAFs CONSIDERADAS					%		Banda	$\odot_v$	Horário
Daf 15°	Daf 18°	Daf 20°	Daf 22°	Daf 24°	PV	CV			
2,8238	2,8325	2,8313	2,8263	2,8375	0,4869	0,1708	1	0°	7:00
6,0633	6,2222	6,2789	6,3733	6,4544	6,4504	2,1299	2	0°	7:00
3,4271	3,5114	3,5400	3,5900	3,6343	6,0442	1,9948	3	0°	7:00
64,5256	65,2506	65,4713	65,7694	66,0875	2,4205	0,8085	4	0°	7:00
2,7538	2,7075	2,6850	2,6425	2,6225	4,7662	1,7413	1	0°	9:00
5,7478	5,6578	5,6111	5,5289	5,4889	4,5042	1,6437	2	0°	9:00
3,2557	3,2043	3,1743	3,1271	3,1029	4,6950	1,7173	3	0°	9:00
62,8038	62,2888	62,0181	61,5175	61,2838	2,4202	0,8760	4	0°	9:00
2,7538	2,7075	2,6850	2,6425	2,6225	4,7662	1,7413	1	0°	11:00
5,7478	5,6578	5,6111	5,5289	5,4889	4,5042	1,6437	2	0°	11:00
3,2557	3,2043	3,1743	3,1271	3,1029	4,6950	1,7173	3	0°	11:00
62,8038	62,2888	62,0181	61,5175	61,2838	2,4202	0,8760	4	0°	11:00
2,7538	2,7075	2,6850	2,6425	2,6225	4,7662	1,7413	1	0°	13:00
5,7478	5,6578	5,6111	5,5289	5,4889	4,5042	1,6437	2	0°	13:00
3,2557	3,2043	3,1743	3,1271	3,1029	4,6950	1,7173	3	0°	13:00
62,8038	62,2888	62,0181	61,5175	61,2838	2,4202	0,8760	4	0°	13:00
2,7875	2,7875	2,7813	2,7725	2,7788	0,3139	0,2038	1	30°	7:00
5,9922	6,1422	6,1889	6,2844	6,3567	6,0820	2,0175	2	30°	7:00
3,3857	3,4586	3,4829	3,5300	3,5700	5,4430	1,8059	3	30°	7:00
64,1656	64,8369	65,0131	65,3013	65,5706	2,1896	0,7338	4	30°	7:00
2,7588	2,7150	2,6938	2,6513	2,6313	4,6217	1,6888	1	30°	9:00
5,7544	5,6711	5,6278	5,5467	5,5100	4,2479	1,5549	2	30°	9:00
3,2614	3,2114	3,1857	3,1371	3,1157	4,4678	1,6385	3	30°	9:00
62,8469	62,3563	62,0956	61,6156	61,3906	2,3171	0,8384	4	30°	9:00
2,7700	2,7350	2,7150	2,6838	2,6663	3,7455	1,3561	1	30°	11:00
5,7833	5,7133	5,6756	5,6122	5,5789	3,5351	1,2799	2	30°	11:00
3,2800	3,2400	3,2171	3,1800	3,1614	3,6150	1,3155	3	30°	11:00
62,9944	62,5744	62,3513	61,9456	61,7500	1,9754	0,7123	4	30°	11:00
2,7838	2,7550	2,7388	2,7125	2,6950	3,1881	1,1411	1	30°	13:00
5,8089	5,7511	5,7222	5,6678	5,6433	2,8500	1,0336	2	30°	13:00
3,2957	3,2643	3,2443	3,2157	3,2014	2,8609	1,0405	3	30°	13:00
63,1250	62,7688	62,5800	62,2356	62,0719	1,6683	0,6009	4	30°	13:00

Comparando os valores das médias das bandas contidos nesta Tabela 4.3 com os respectivos valores contidos na Tabela 4.2, verificou-se que com o aumento do IAF (de 0,5 para 4,0), houve uma diminuição dos valores das médias de reflectância

referentes à região do visível e um aumento destes valores para a região do infravermelho. Este resultado foi coerente com aqueles obtidos quando da análise de sensibilidade do modelo em relação às variações do IAF, os quais foram discutidos no item 4.1.1.

Para  $\theta_v=0^\circ$  e horário de 7:00h (Tabela 4.3), o aumento do ângulo de inclinação foliar acarretou o aumento da reflectância do dossel em todas as bandas. Aqui as considerações de JACKSON et al. (1979) já mencionadas sobre os efeitos da iluminação oblíqua sobre a reflectância espectral de um dossel foram concordantes com estes resultados. Ainda, para uma condição de IAF=4,0, o solo foi completamente coberto pela vegetação, o que minimizou seu efeito sobre a reflectância do dossel.

Para os demais horários e ainda  $\theta_v=0^\circ$  (Tabela 4.3), verificou-se a diminuição na reflectância do dossel em todas as bandas. Mais uma vez, o aumento do ângulo de inclinação foliar acarretou a diminuição da reflectância do dossel para todas as bandas. Isto pode ser explicado pela melhor visualização das folhas presentes em camadas menos iluminadas localizadas no interior do dossel (GOEL, 1988).

Para  $\theta_v=30^\circ$  e todos os horários (Tabela 4.3), em relação aos valores referentes à  $\theta_v=0^\circ$ , foi verificada a mesma dinâmica nos valores de reflectância já discutida para os dados apresentados na Tabela 4.2, valendo portanto os mesmos comentários.

Os valores relativamente pequenos de PV e VC, referentes às reflectâncias calculadas pelo modelo, confirmaram a

afirmação de MAJOR et al. (1992) sobre a pequena influência da variação da DAF sobre a reflectância do dossel.

A amplitude de variação dos ângulos da DAF ( $15^{\circ}$  a  $24^{\circ}$ ) caracterizou o dossel considerado nestas simulações como planófilo. Segundo WANJURA e HATFIELD (1988) os dosséis planófilos apresentam menores variações em sua reflectância espectral do que os dosséis erectófilos, submetidos a diferentes condições geométricas de iluminação e visada.

#### 4.1.3 Iluminação: Zênite e Azimute

Na Tabela 4.4 encontram-se as médias das bandas 1, 2, 3 e 4 para os horários compreendidos entre 7:00 e 17:00h, considerando ainda os IAFs de 0,5 e de 4,0.

TABELA 4.4 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES HORÁRIOS

HORÁRIOS											
Bandas	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
IAF=0,5											
1	4,91000	5,14500	5,18625	5,19375	5,19625	5,19750	5,19625	5,19375	5,18500	5,14500	4,86500
2	8,13556	8,10667	8,12000	8,12333	8,12667	8,12667	8,12667	8,12333	8,11889	8,10667	8,15000
3	8,17714	8,74571	8,84429	8,86286	8,87000	8,87143	8,86857	8,86286	8,84000	8,74571	8,06143
4	33,80250	30,90563	30,53750	30,48938	30,47938	30,47750	30,47938	30,48938	30,54375	30,90563	34,44313
IAF=4,0											
1	2,76375	2,67625	2,67000	2,67125	2,67125	2,67125	2,67125	2,67125	2,67000	2,67625	2,78375
2	6,14333	5,65111	5,59222	5,58556	5,58556	5,58556	5,58556	5,58556	5,59222	5,65111	6,24333
3	3,45571	3,19429	3,16429	3,16429	3,16429	3,16429	3,16429	3,16429	3,16429	3,19429	3,51143
4	64,71000	62,26000	61,87750	61,83625	61,82875	61,82750	61,82875	61,83625	61,88438	62,26000	65,12875

Considerando primeiramente os resultados para IAF= 0,5, verificou-se que com a diminuição dos valores de  $\theta_s$  (de 7:00h para 12:00h), os valores das médias de reflectância do dossel referentes à região do visível apresentaram tendência a

aumentarem, enquanto que na região do infravermelho os valores seguiram tendência oposta. Este resultado demonstrou que o modelo considerou o efeito do solo sobre a reflectância do dossel, uma vez que para  $IAF=0,5$  o solo foi tratado como parcialmente coberto pela vegetação.

RANSON et al. (1981) encontraram tendências semelhantes para dosséis menos densos. Os autores atribuíram estas tendências à maior participação do solo com a diminuição de  $\theta_s$ .

Para  $IAF=4,0$ , para as situações cuja iluminação foi mais oblíqua, os valores de reflectância tenderam a aumentar (7:00h e 17:00h). Com o aumento da elevação solar, a reflectância tendeu a diminuir. Estes resultados estiveram de acordo com as afirmações de JACKSON et al. (1977), referente à iluminação mais uniforme das folhas situadas nas diversas camadas do dossel quando o Sol encontra-se menos elevado (maior  $\theta_s$ ).

#### 4.1.4 Visada: Zênite e Azimute

Os valores das médias para as 4 bandas, referentes ao efeito de  $\theta_v$  encontram-se apresentados na Tabela 4.5, considerando os IAFs de 0,5 e de 4,0 e as duas situações de iluminação (manhã e tarde).

Para  $IAF=0,5$ ,  $\theta_s=65^\circ$  e  $\psi_s=68^\circ$ , verificou-se que com o aumento dos valores de  $\theta_v$  houve uma tendência de diminuição dos valores das médias de reflectância do dossel em todas as bandas. Entretanto, para a banda 2 essa tendência foi invertida a partir de  $\theta_v=50^\circ$ , enquanto para a banda 4 essa inversão ocorreu a partir de  $\theta_v=35^\circ$ .

TABELA 4.5 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE  $\Theta_V$

ÂNGULOS ZENITAIS DE VISADA ( $\Theta_V$ )												
Bandas	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
IAF=0,5 $\Theta_s=65^\circ$ , $\Psi_s=68^\circ$												
1	5,1500	5,1500	5,1475	5,1475	5,1450	5,1437	5,1437	5,1400	5,1375	5,1325	5,1250	5,1125
2	8,1066	8,1055	8,1022	8,1022	8,1011	8,0988	8,0966	8,0933	8,0922	8,0900	8,0911	8,0911
3	8,7585	8,7571	8,7557	8,7557	8,7557	8,7528	8,7500	8,7442	8,7400	8,7314	8,7157	8,6885
4	30,8368	30,8287	30,8206	30,8131	30,8056	30,7975	30,7956	30,7981	30,8106	30,8387	30,8881	31,0318
IAF=4,0 $\Theta_s=65^\circ$ , $\Psi_s=68^\circ$												
1	2,6737	2,6737	2,6712	2,6712	2,6675	2,6662	2,6650	2,6650	2,6637	2,6637	2,6637	2,6687
2	5,6377	5,6355	5,6333	5,6311	5,6277	5,6255	5,6244	5,6244	5,6244	5,6288	5,6388	5,6688
3	3,1871	3,1871	3,1842	3,1828	3,1785	3,1785	3,1771	3,1771	3,1771	3,1785	3,1828	3,1957
4	62,1837	62,1731	62,1593	62,1450	62,1318	62,1187	62,1118	62,1118	62,1181	62,1475	62,2043	62,3681
IAF=0,5 $\Theta_s=34^\circ$ , $\Psi_s=333^\circ$												
1	5,2025	5,2062	5,2137	5,2187	5,2275	5,2312	5,2400	5,2450	5,2512	5,2562	5,2637	5,2612
2	8,1366	8,1477	8,1633	8,1733	8,1866	8,2000	8,2166	8,2300	8,2477	8,2666	8,2855	8,3066
3	8,8757	8,8842	8,8900	8,9000	8,9085	8,9142	8,9228	8,9285	8,9357	8,9385	8,9400	8,9242
4	30,5381	30,5962	30,6581	30,7225	30,7887	30,8650	30,9456	31,0393	31,1462	31,2781	31,4443	31,6868
IAF=4,0 $\Theta_s=34^\circ$ , $\Psi_s=333^\circ$												
1	2,6812	2,6912	2,7000	2,7112	2,7225	2,7337	2,7462	2,7575	2,7725	2,7912	2,8112	2,8387
2	5,6055	5,6255	5,6455	5,6655	5,6855	5,7111	5,7366	5,7666	5,7966	5,8333	5,8788	5,9400
3	3,1742	3,1885	3,1985	3,2157	3,2271	3,2428	3,2571	3,2757	3,2971	3,3200	3,3485	3,3800
4	61,9256	62,0256	62,1250	62,2312	62,3437	62,4650	62,5987	62,7437	62,9137	63,1100	63,3512	63,6762

RANSON et al. (1981) verificaram que a reflectância de dosséis de soja diminuíram com o aumento de  $\Theta_V$  nas bandas do visível até  $\Theta_V=30^\circ$ , a partir do qual manteve-se estável. Os autores mencionaram que a partir deste ângulo de visada o solo não foi mais visualizado pelo sensor. Na região do infravermelho a reflectância do dossel diminuiu e depois aumentou para valores maiores do que  $30^\circ$ .

Para a mesma situação de iluminação ( $\Theta_S = 65^\circ$  e  $\psi_S = 68^\circ$ ), mas para IAF= 4,0, as tendências foram exatamente as mesmas daquelas verificadas para IAF= 0,5. Isso contrariou as afirmações destes autores sobre o aumento da reflectância do dossel com o aumento de  $\Theta_V$ , para ambas as regiões espectrais, quando considerando o caso de dosséis mais densos.

Considerando agora os horários da parte da tarde ( $\Theta_S = 34^\circ$  e  $\psi_S = 333^\circ$ ), os valores das médias aumentaram com o aumento de  $\Theta_V$ . Este resultado foi contrário aos apresentados por RANSON et al. (1981), conforme discussão já apresentada nos itens anteriores referentes às visadas no mesmo plano de iluminação.

A outra variável analisada foi o  $\psi_V$ . Seu efeito foi estudado para  $\Theta_V = 15^\circ$  e  $30^\circ$  e para IAF de 0,5 e de 4,0. Na Tabela 4.6 encontram-se os valores das médias para as 4 bandas, referentes as variações de  $\psi_V$ .

A análise dos dados contidos na Tabela 4.6 pode ser melhor entendida pela Figura 4.1, que apresenta a posição solar fixa ( $\psi_S = 68^\circ$ ) e os demais valores de  $\psi_V$  considerados nesta simulação.

Verificou-se que à medida que os valores de  $\psi_V$  se aproximaram do valor de  $\psi_S = 68^\circ$  (direção do retroespalhamento), os valores das médias das reflectâncias das quatro bandas espectrais aumentaram. Os valores mínimos das reflectâncias para as quatro bandas foram alcançados para  $\psi_V = 225^\circ$  e  $\psi_V = 270^\circ$ , ou seja, numa situação diametralmente oposta à incidência da REM. Estes resultados foram coerentes com as afirmações de RANSON et al. (1981) e RANSON et al. (1986)

quando estes autores estudaram o efeito de diferentes geometrias de visada sobre a reflectância de dosséis.

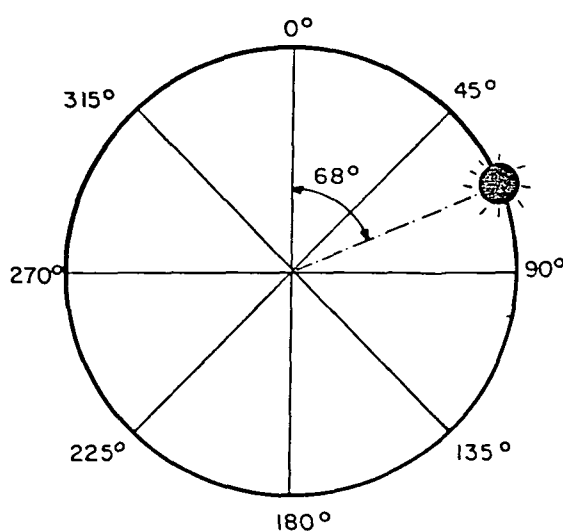
TABELA 4.6 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE  $\psi_v$

ÂNGULOS AZIMUTAIS DE VISADA ( $\psi_v$ )									
Bandas	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	$\psi_v$
IAF=0,5 $\theta_s=65^\circ$ , $\phi_s=68^\circ$									
1	5,16625	5,19250	5,19250	5,16750	5,13375	5,10875	5,10875	5,13375	15°
2	8,13778	8,18556	8,18667	8,14111	8,07556	8,03000	8,02889	8,07333	15°
3	8,78286	8,81143	8,81143	8,78286	8,74000	8,71000	8,71000	8,73857	15°
4	31,00875	31,24938	31,25000	31,01563	30,67938	30,43875	30,43625	30,67313	15°
1	5,18500	5,23750	5,23875	5,18750	5,11375	5,06250	5,06250	5,11250	30°
2	8,17556	8,27556	8,27889	8,17889	8,04111	7,94333	7,94111	8,03778	30°
3	8,80286	8,86857	8,87000	8,80714	8,71429	8,65143	8,65143	8,71286	30°
4	31,20063	31,72313	31,73000	31,21688	30,49625	29,98500	29,97813	30,48000	30°
IAF=4,0 $\theta_s=65^\circ$ , $\phi_s=68^\circ$									
1	2,70250	2,74000	2,74125	2,70500	2,64750	2,60750	2,60750	2,64500	15°
2	5,69333	5,76667	5,76778	5,69444	5,59000	5,51222	5,51222	5,58556	15°
3	3,22286	3,27143	3,27286	3,22429	3,15286	3,10429	3,10429	3,15286	15°
4	62,46500	62,85625	62,86125	62,47625	61,92625	61,53688	61,53063	61,91563	15°
1	2,73125	2,82000	2,82000	2,73625	2,61625	2,53250	2,53250	2,61375	30°
2	5,75333	5,91889	5,92000	5,75667	5,53111	5,36778	5,36778	5,52444	30°
3	3,26000	3,36857	3,36857	3,26571	3,11714	3,01286	3,01286	3,11429	30°
4	62,77625	63,62938	63,63938	62,80250	61,62625	60,79313	60,78250	61,60063	30°



Segundo estes autores, quando o sensor visa obliquamente um dossel sob uma condição de iluminação na qual o Sol encontra-se posicionado aproximadamente em frente ao sensor (também obliquamente), ocorre um maior sombreamento dentro do dossel, com a conseqüente diminuição da sua reflectância.

FIGURA 4.1 AZIMUTES DE VISADA EM RELAÇÃO AO AZIMUTE SOLAR



#### 4.1.5 Reflectância e Transmitância hemisféricas das folhas

A Tabela 4.7 contém as médias das quatro bandas espectrais referentes aos valores de reflectância calculados e as reflectâncias e transmitâncias hemisféricas utilizadas para sua determinação, bem como os respectivos valores de PV e CV.

Os valores de PV e CV apresentados na Tabela 4.7 se referem à variação dos valores de reflectância calculada para o dossel,  $\rho$  e  $\tau$ , tomando-se como referência os valores mínimos utilizados, ou seja, aqueles determinados para -60% em relação aos valores iniciais (0%).

TABELA 4.7 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE  $\rho$  e DE  $\tau$

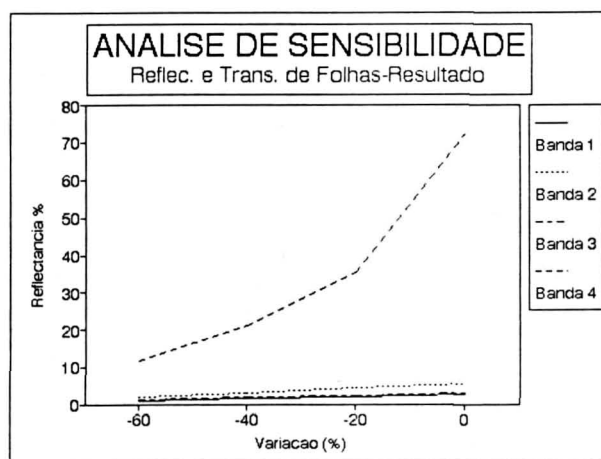
Reflectância e Transmitância Hemisféricas						
Bandas	-60%	-40%	-20%	0%	PV(%)	CV(%)
Valores calculados						
1	1,0450	1,5800	2,1213	2,6713	155,6220	32,6787
2	2,0878	3,2100	4,3900	5,6344	169,8776	34,5086
3	1,2171	1,8514	2,5071	3,1786	161,1502	33,4124
4	11,9287	21,0533	35,3553	72,1907	505,1864	65,3745
Reflectância Hemisférica						
1	2,2063	3,3088	4,4125	5,5150	149,9717	31,9428
2	4,2044	6,3122	8,4111	10,5144	150,0793	31,9419
3	2,5143	3,7700	5,0271	6,2843	149,9432	31,9407
4	19,9560	29,9360	39,9133	49,8920	150,0100	31,9443
Transmitância Hemisférica						
1	1,0513	1,5725	2,0988	2,6238	149,5838	31,9222
2	4,3167	6,4733	8,6322	10,7900	149,9614	31,9420
3	2,3000	3,4500	4,6029	5,7514	150,0621	31,9552
4	19,1093	28,6627	38,2173	47,7720	149,9930	31,9435

Cómo pode ser observado ainda nesta tabela, o aumento nos valores dos parâmetros referentes a  $\rho$  e  $\tau$  acarretou também um aumento nos valores da reflectância do dossel de forma quase proporcional.

Na região do infravermelho próximo, notou-se uma maior sensibilidade do modelo, marcada pela diminuição acentuada dos valores de reflectância do dossel com a diminuição dos valores de  $\rho$  e  $\tau$ , em relação à região do visível. Esta constatação foi válida tanto para a reflectância quanto para a transmitância das folhas.

A Figura 4.2 ilustra o comportamento das médias das reflectâncias calculadas em cada simulação, bem como a maior sensibilidade mencionada.

FIGURA 4.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MÉDIAS DAS QUATRO BANDAS EM RELAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES DE  $\rho$  E DE  $\tau$



Este fato pode ser explicado pelo próprio processo de interação da REM com a vegetação nesta região espectral. Sabe-se que os aspectos mais relevantes e influentes na reflexão da radiação nesta região se referem àqueles relacionados à estrutura interna da folha (GAUSMAN et al., 1969; KUMAR, 1972) e, para o caso de um dossel, à sua estrutura espacial (arranjo e quantidade de folhas, galhos, etc). Quanto mais reflexiva for uma folha na região do infravermelho próximo, maior será a probabilidade da radiação refletida interagir com outras folhas que, se possuírem as mesmas propriedades espectrais da primeira, promoverão um efeito multiplicativo nessa reflexão, aumentando, por sua vez,

a probabilidade de espalhamento da radiação em direção ao sensor (para fora do dossel). Com isso, ocorre um aumento da reflectância. Uma pequena diminuição neste poder de reflexão das folhas, acarretará o mesmo efeito multiplicador, mas no sentido oposto, diminuindo a reflectância do dossel (GOEL, 1988).

#### 4.1.6 Reflectância hemisférica do solo

A Tabela 4.8 contém as médias das reflectâncias calculadas para as quatro bandas, em relação às variações de  $\rho_s$ . Os valores percentuais apresentados na porção superior desta tabela referem-se aos percentuais de variação adotados para o cálculo dos vetores de  $\rho_s$ . Como mencionado no item 3.2.4, as simulações foram conduzidas para duas situações distintas de cobertura do solo (IAF= 0,5 e IAF= 4,0).

A análise dos dados contidos nesta tabela permitiu constatar que para o IAF=4,0, ou seja, para uma condição na qual o solo encontrou-se praticamente coberto pelos elementos do dossel, as variações nos valores de  $\rho_s$  acarretaram alterações muito pequenas na reflectância do dossel, quando comparadas àquelas verificadas para IAF=0,5 na qual o solo foi praticamente exposto.

Estes resultados foram coerentes com as afirmações de GOEL (1988), referentes ao efeito da reflectância do solo sobre a reflectância de dosséis, quando estes apresentam valores de IAF superiores a 3 (considerados pelo autor como dosséis densos). Estiveram também de acordo com COOPER e SMITH (1985), que desenvolveram um modelo matemático para estudar o

efeito da reflectância dos solos sobre a reflectância de dosséis pouco densos ou esparsos.

TABELA 4.8 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE  $\rho_s$

Bandas	-60%	-40%	-20%	0%	+20%	+40%	+60%	PV(%)	CV(%)
IAF=0,5									
1	3,0225	3,7325	4,4400	5,1500	5,8625	6,5713	7,2813	140,9016	27,5599
2	5,1589	6,1422	7,1244	8,1078	9,0933	10,0800	11,0700	114,5811	24,2862
3	4,6200	5,9986	7,3771	8,7600	10,1429	11,5314	12,9157	179,5609	31,5577
4	23,1000	25,6431	28,2238	30,8450	33,5081	36,2113	38,9606	68,6607	17,0928
IAF=4,0									
1	2,6713	2,6738	2,6738	2,6750	2,6750	2,6750	2,6775	0,2340	0,0654
2	5,6333	5,6356	5,6367	5,6411	5,6433	5,6444	5,6489	0,2761	0,0911
3	3,1800	3,1843	3,1871	3,1886	3,1914	3,1957	3,1957	0,4942	0,1688
4	60,9631	61,3531	61,7631	62,1956	62,6538	63,1350	63,6475	4,4033	1,4369
Reflectância Hemisférica do solo									
1	3,5688	5,3513	7,1350	8,9200	10,7050	12,4888	14,2713	-2,9990	40,0004
2	4,5556	6,8333	9,1122	11,3889	13,6656	15,9444	18,2222	-3,0000	39,9986
3	6,7286	10,0886	13,4529	16,8171	20,1814	23,5457	26,9057	-2,9987	39,9993
4	7,6447	11,4693	15,2913	19,1140	22,9367	26,7587	30,5833	-3,0006	40,0006

HUETE (1989) mencionou que a contribuição do solo na reflectância de um dossel dever ser considerada em situações as quais foram definidas pelo autor como dosséis parcialmente cobertos pelo solo.

#### 4.1.7 Fração de Irradiância Difusa (SKYL)

A Tabela 4.9 contém as médias das bandas 1, 2, 3 e 4 determinadas para cada um dos vetores SKYL considerados, e ainda os valores de PVs e CVs.

TABELA 4.9 MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DO DOSSEL PARA AS QUATRO BANDAS ESPECTRAIS CONSIDERANDO DIFERENTES VETORES SKYL

Bandas	SIMULAÇÕES											PV	CV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	(%)	(%)
1	2,63000	2,63125	2,63250	2,63500	2,63625	2,63875	2,63875	2,64125	2,64250	2,64375	2,64500	0,57	0,186099
2	5,49222	5,50000	5,51000	5,52000	5,52667	5,53667	5,54556	5,55556	5,56333	5,57222	5,58222	1,64	0,513593
3	3,10286	3,10714	3,11286	3,11571	3,12286	3,12571	3,13000	3,13571	3,14286	3,14429	3,15000	1,52	0,480577
4	71,96533	71,99000	72,01400	72,03867	72,06333	72,08667	72,11267	72,13533	72,16200	72,18400	72,21067	0,34	0,107254
Valores para os Vetores SKYL												PV(%)	CV(%)
												816,47	50,54
												1552,22	55,62
												5719,28	60,83
												4629,45	60,05

Os PVs e CVs foram também determinados para as respectivas bandas dos vetores SKYL, uma vez que as variações foram promovidas através da adição de uma constante (de valor 5) aos valores dos vetores SKYL, o que acarretou PVs e CVs diferenciados.

Notou-se que as variações nos valores da fração SKYL foram também diretamente proporcionais àquelas detectadas nos valores de reflectância do dossel, ressaltando contudo as amplitudes das diferenças entre PV e CV dos vetores SKYL e das reflectâncias calculadas.

#### 4.1.8 Considerações gerais sobre os resultados da Análise de Sensibilidade

A análise de cada um dos resultados apresentados permitiu verificar que, de maneira geral, as variações simuladas nos parâmetros IAF, DAF,  $\theta_v$ ,  $\psi_v$ ,  $\theta_s$ ,  $\psi_s$  e SKYL acarretaram variações proporcionalmente muito pequenas nos valores de reflectância calculados pelo modelo, para as quatro bandas. Esta conclusão advém da comparação entre os PVs e CVs dos parâmetros de entrada e das respectivas reflectâncias calculadas. Para o caso dos parâmetros angulares, levou-se em conta o efeito de suas variações sobre os valores das reflectâncias calculadas. Assim o que se buscou, não foi a comparação entre percentuais de variação, mas sim analisar as tendências dessa variação, ou seja, como variaram os valores da reflectância calculada pelo modelo em relação às variações de  $\theta_s$  e  $\psi_s$ .

Os resultados indicaram que as magnitudes das variações das reflectâncias calculadas pelo modelo foram sempre pequenas em relação às variações dos parâmetros angulares.

A sensibilidade do modelo frente a variações de  $\rho_s$  foi maior quando o solo "foi mais exposto" (IAF=0,5), do que aquela apresentada para uma situação de solo "totalmente coberto" (IAF=4,0).

O modelo foi bastante sensível às variações de  $\rho$  e  $\tau$ , sendo estes dois parâmetros então aqueles de maior influência sobre os valores de reflectância calculados.

MAJOR et al. (1992) realizaram uma análise de sensibilidade com uma versão mais sofisticada do modelo SAIL,

explorando os parâmetros aqui considerados, tendo encontrado resultados semelhantes.

#### 4.2 PARÂMETROS BIOFISICOS

Neste item são apresentados os valores determinados para os parâmetros biofísicos IAF e DAF do dosséis considerados neste trabalho.

##### 4.2.1 Índice de Área Foliar (IAF)

No Apêndice B encontram-se duas tabelas contendo as dimensões (comprimento, largura e área) das 100 folhas de cada espécie (Eucalipto e Peroba) que foram utilizadas na estimativa dos coeficientes das equações de regressão linear. Estas equações foram usadas na determinação das áreas foliares totais ( $A_i$  total) de cada IFOV dos dosséis, levando em consideração o comprimento e a largura das folhas das quatro mudas selecionadas.

Foram então obtidas as seguintes equações:

$$y_1 = 0,259858 + 0,676098x$$

$$y_2 = 0,227297 + 0,702789x$$

onde:  $y_1$  = área das folhas de Eucalipto;

$y_2$  = área das folhas de Peroba;

$x$  = produto comprimento x largura.

Seguiu-se o cálculo dos IAFs, considerando a área ocupada por essas mudas em cada dossel específico. A Tabela 4.10 contém os valores dos IAFs determinados para cada IFOV de cada dossel.



Os IAFs do dossel de Eucalipto apresentaram valores mais elevados e conseqüentemente menos influentes sobre os valores das reflectâncias calculadas através do modelo, conforme demonstrado pelos resultados obtidos na análise de sensibilidade do modelo.

TABELA 4.10 VALORES DE IAF PARA CADA IFOV E TIPO DE DOSSEL

IFOV	EUCALIPTO	PEROBA	PEROBA + EUCALIPTO		
			Camada 1	Camada 2	Total
1	3,44	0,94	1,09	1,30	2,39
2	3,82	0,51	0,50	1,37	1,87
3	3,19	0,67	0,81	1,47	2,28
4	2,56	0,62	0,72	1,23	1,95
5	3,74	0,63	0,42	1,14	1,56
6	3,73	0,55	0,61	1,24	1,85
7	3,60	0,52	0,43	1,29	1,72
8	3,78	0,39	0,56	1,11	1,67
9	3,76				
10	4,39				
11	3,89				
12	4,21				
13	4,80				
14	3,40				
15	4,31				
16	3,22				
17	4,31				
18	3,67				
19	3,29				
20	2,82				
Médias	3,70	0,60			1,91

Conforme descrito no item 3.3.1.2 (Coleta de dados biofísicos), foram realizados cálculos visando estimar os erros que estariam sendo cometidos adotando-se o número de quatro mudas como intensidade amostral. A Tabela 4.11 apresenta o resultado destes cálculos para um nível de 95% de probabilidade.

Os valores percentuais apresentados na Tabela 4.11 não excederam o valor de 30%, que foi definido como sendo o valor máximo permitido. Desta forma, aceitou-se a intensidade amostral adotada.

TABELA 4.11 ERROS ESTIMADOS DEVIDO À INTENSIDADE AMOSTRAL

IFOV	EUCALIPTO	PEROBA
1	15,97%	16,09%
2	18,64%	22,66%
3	15,43%	16,24%
4	23,87%	23,55%
5	12,61%	22,52%
6	11,41%	18,82%
7	17,57%	17,50%
8	14,47%	18,70%
9	11,76%	
10	13,42%	
11	18,70%	
12	23,44%	
13	15,93%	
14	16,24%	
15	20,32%	
16	13,77%	
17	13,02%	
18	14,17%	
19	19,68%	
20	27,25%	

#### 4.2.2 Distribuição Angular de Folhas (DAF)

A Tabela 4.12 contém os valores das frequências relativas das classes da DAF que foram utilizadas no processamento do programa SAIL.

As classes da DAF já foram apresentadas na Tabela 3.3.

TABELA 4.12 VALORES DAS FREQUÊNCIAS RELATIVAS DAS CLASSES DA DAF

CLASSES											
DOSSEL	IFOV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Num.Obs.
EUCAL .	1	0,3114	0,3115	0,1803	0,1312	0,0328	0,0164	0,0164	-	-	59
	2	0,2834	0,2834	0,2000	0,1331	0,0667	0,0334	-	-	-	51
	3	0,2667	0,2500	0,2166	0,1667	0,0833	0,0167	-	-	-	54
	4	0,3276	0,2069	0,2241	0,1552	0,0690	-	-	0,0172	-	35
	5	0,3276	0,2242	0,1551	0,2068	0,0517	0,0346	-	-	-	45
	6	0,3684	0,2456	0,1930	0,1053	0,0526	0,0351	-	-	-	39
	7	0,2182	0,2909	0,1636	0,2727	0,0364	0,0182	-	-	-	54
	8	0,2418	0,3283	0,3158	0,0565	0,0380	0,0010	0,0185	-	-	59
	9	0,2832	0,3585	0,1320	0,1886	0,0377	-	-	-	-	55
	10	0,1154	0,2692	0,2692	0,2500	0,0962	-	-	-	-	59
	11	0,2341	0,2552	0,1915	0,2128	0,0638	0,0425	-	-	-	55
	12	0,3254	0,2791	0,1163	0,0931	0,1395	0,0233	0,0233	-	-	42
	13	0,2381	0,2381	0,2619	0,1667	0,0476	0,0238	0,0238	-	-	60
	14	0,1305	0,3157	0,2631	0,1316	0,0263	0,0526	-	-	-	44
	15	0,3429	0,1861	0,1714	0,1714	0,0571	0,0286	0,0286	-	-	58
	16	0,2333	0,2334	0,2333	0,0677	0,2000	0,0333	-	-	-	26
	17	0,3214	0,2858	0,2500	0,0357	0,0357	0,0714	-	-	-	21
	18	0,1923	0,3846	0,0769	0,1154	0,1923	0,0385	-	-	-	22
	19	0,2726	0,3182	0,1818	0,1819	0,0455	-	-	-	-	28
	20	0,2271	0,2728	0,3182	0,1364	-	0,0455	-	-	-	27
PEROBA	1	0,0520	0,3247	0,2077	0,1688	0,1299	0,0655	0,0130	0,0259	0,0130	73
	2	0,0448	0,1791	0,1940	0,2836	0,1493	0,0896	0,0299	0,0148	0,0149	60
	3	0,0308	0,1845	0,3231	0,2307	0,1539	0,0616	0,0154	-	-	65
	4	0,0323	0,2419	0,1936	0,3064	0,1775	0,0323	0,0162	-	-	61
	5	0,0339	0,1186	0,2712	0,3228	0,1355	0,0847	0,0169	-	0,0169	60
	6	0,1482	0,3889	0,2593	0,0740	0,1296	-	-	-	-	55
	7	0,1200	0,1600	0,5000	0,2000	-	0,0200	-	-	-	62
	8	0,1591	0,2046	0,2500	0,1818	0,2055	-	-	-	-	44
PER + EUCAL	1	0,1721	0,2541	0,1885	0,1639	0,1066	0,0574	0,0082	0,0328	0,0164	126
	2	0,1965	0,1886	0,2049	0,1722	0,1148	0,0820	0,0246	-	0,0164	106
	3	0,1500	0,1917	0,2583	0,1750	0,1167	0,0583	0,0333	-	0,0167	112
	4	0,1417	0,1792	0,2453	0,2264	0,1321	0,0377	0,0188	0,0094	0,0094	100
	5	0,0920	0,1632	0,2551	0,2755	0,1224	0,0510	0,0204	-	0,0204	91
	6	0,1612	0,3656	0,2258	0,1183	0,1183	0,0180	-	-	-	107
	7	0,1305	0,1848	0,3261	0,2174	0,0760	0,0434	-	-	0,0218	109
	8	0,1917	0,2329	0,1918	0,2055	0,1370	0,0274	-	-	0,0137	82

Para o processamento do programa CANOPY, o dossel de Peroba+Eucalipto foi considerado como sendo constituído por duas camadas que tiveram suas DAFs definidas, as quais encontram-se apresentadas na Tabela 4.13.

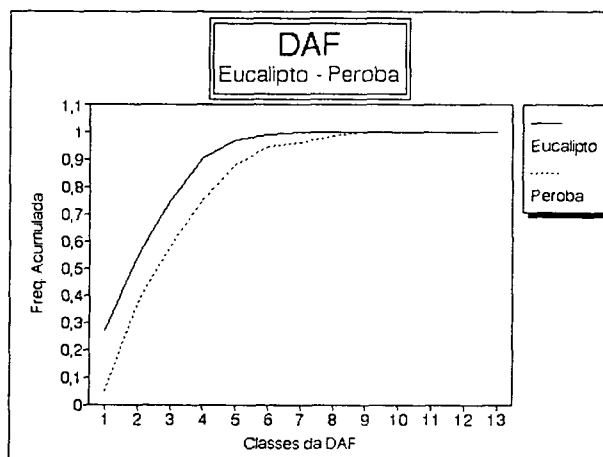
TABELA 4.13. VALORES DAS FREQUÊNCIAS RELATIVAS DAS CLASSES DA DAF USADAS NO PROGRAMA CANOPY

-----											
CLASSES											
IFOV	CAMADA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Num.Obs.
1	1	0,1111	0,2540	0,1746	0,1746	0,1428	0,0634	0,0159	0,0317	0,0318	62
	2	0,2699	0,2381	0,1905	0,1429	0,0635	0,0635	-	0,0318	-	64
2	1	0,1290	0,2097	0,2419	0,1613	0,0967	0,0968	0,0323	-	0,0318	46
	2	0,2667	0,1667	0,1667	0,1833	0,1333	0,0667	0,0167	-	-	60
3	1	0,1167	0,2000	0,2500	0,1667	0,1333	0,0667	0,0333	-	0,0334	52
	2	0,1833	0,1834	0,2667	0,1833	0,1000	0,0500	0,0334	-	-	60
4	1	0,1132	0,1698	0,3207	0,1887	0,1689	0,0189	0,0189	-	-	47
	2	0,1698	0,1887	0,1698	0,2641	0,0943	0,0566	0,0189	0,0189	0,0189	53
5	1	0,1539	0,1346	0,2500	0,2500	0,0962	0,0577	0,0192	-	0,0384	35
	2	0,0426	0,1915	0,2553	0,2979	0,1490	0,0426	0,0213	-	-	53
6	1	0,1702	0,5319	0,1277	0,0851	0,0851	-	-	-	-	46
	2	0,1521	0,1956	0,3261	0,1522	0,1521	0,0217	-	-	-	60
7	1	0,1956	0,1740	0,3478	0,2391	0,0217	0,0217	-	-	-	46
	2	0,0652	0,1957	0,3044	0,1956	0,1305	0,0652	-	-	0,0434	63
8	1	0,2433	0,2162	0,1351	0,2703	0,1081	0,0270	-	-	-	36
	2	0,1389	0,2500	0,2500	0,1389	0,1944	0,1667	0,0278	-	0,0278	46
-----											

Aqui valem os mesmos intervalos de ângulos de inclinação foliar para as classes da DAF já mencionados.

Foram também definidas as DAFs denominadas únicas para os dosséis de Eucalipto e Peroba, das quais foram então determinadas as frequências acumuladas, as quais encontram-se apresentadas na Figura 4.3.

FIGURA 4.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DOS ÂNGULOS FOLIARES DOS DOSSÉIS DE EUCALIPTO E PEROBA



Verificou-se que a forma de ambas as curvas dos dosséis de Eucalipto e de Peroba assemelharam-se à forma apresentada pela curva da DAF do tipo planófila (curva "a" da Figura 2.7). A mesma conclusão poderia ser feita analisando-se os dados contidos nas Tabelas 4.12 e 4.13, nas quais pode ser constatado que as maiores frequências relativas ocorreram nas classes de menor ângulo de inclinação, indicando então a dominância de folhas em posições próximas à horizontal, que caracteriza os dosséis ditos planófilos.

O dossel constituído por ambas as espécies em conjunto foi também considerado planófilo, uma vez que foi constituído por mudas com características semelhantes quanto a esse aspecto.

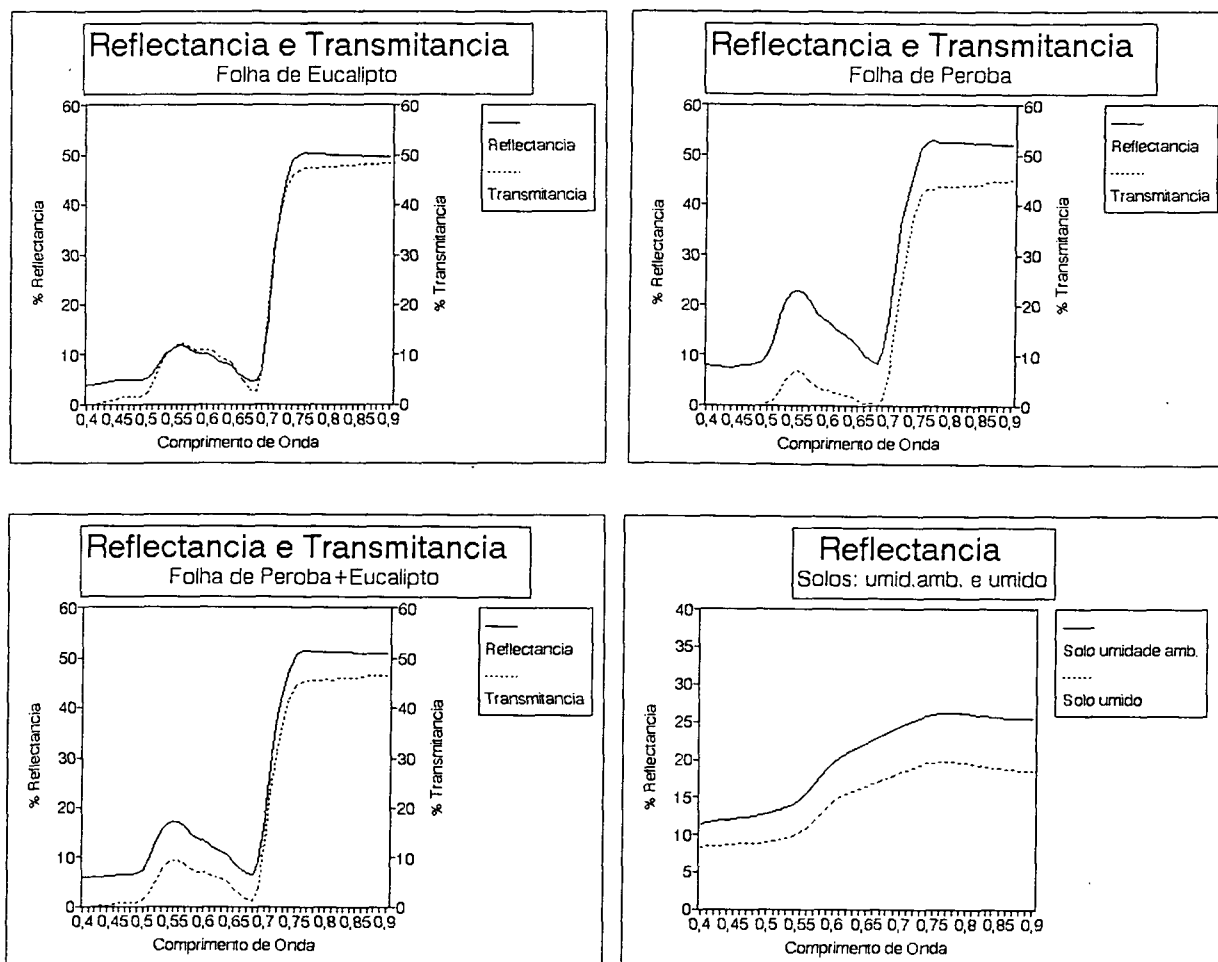
#### 4.3. PARÂMETROS RADIOMÉTRICOS

Neste item são apresentados os resultados referentes às coletas de dados radiométricos realizadas em laboratório ( $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$ ) e à fração de irradiância difusa (SKYL).

##### 4.3.1 Reflectância e Transmitância hemisféricas das folhas e Reflectância hemisférica do solo ( $\rho$ , $\tau$ e $\rho_s$ )

Através da coleta de dados radiométricos conduzida no laboratório do CEPAGRI\ UNICAMP, foram definidos os vetores referentes a  $\rho$ ,  $\tau$ , e  $\rho_s$  que foram usados no processamento do modelo nas duas versões (SAIL e CANOPY). Para o processamento dos dados referentes ao dossel de Peroba+Eucalipto, considerando-o constituído por uma única camada, ou seja, desconsiderando a existência das duas espécies, foi calculado um vetor médio, mediante os valores médios de  $\rho$  e  $\tau$  de ambas as espécies. As representações gráficas referentes a estes vetores encontram-se apresentadas na Figura 4.4.

Considerando primeiramente os gráficos referentes à reflectância e à transmitância espectrais das folhas de ambas as espécies, verificou-se que as diferenças entre estes parâmetros foram maiores para os dados referentes à folha de Peroba, indicando ser esta menos "transparente" do que a folha de Eucalipto, para o intervalo espectral considerado ( $0,40 \mu\text{m}$  à  $0,90 \mu\text{m}$ ). Verificou-se ainda que a folha de Peroba apresentou valores maiores de reflectância, principalmente na região do visível, em relação à folha de Eucalipto.

FIGURA 4.4 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VETORES  $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$ 

POTSCH et al. (1968) apresentaram uma breve descrição das características morfológicas externas das folhas das famílias *Myrtaceae* e *Apocynaceae*, das quais fazem parte os gêneros *Eucalyptus* e *Aspidosperma*, respectivamente.

As diferenças entre as folhas destas duas famílias residem principalmente na presença de glândulas secretoras (folhas das espécies da família *Myrtaceae*), na espessura média

(maior nas folhas das espécies da família *Apocynaceae*), e na textura (mais coreácea nas folhas das espécies da família *Apocynaceae*).

Os dados referentes à média entre as reflectâncias e as transmitâncias das folhas de ambas as espécies, uma vez dispostos na forma gráfica, apresentaram uma forma intermediária entre as formas das curvas dos dados de cada folha separadamente.

#### 4.3.2 Fração de Irradiância Difusa (SKYL)

A Tabela 4.14 apresenta alguns vetores SKYL que foram determinados nos dias e horários indicados. Os valores apresentados nesta tabela são percentuais.

Os elementos destes vetores referiram-se a valores percentuais da fração difusa da irradiância solar.

Como pode ser observado, para cada um dos vetores apresentados, os maiores valores desta fração foram sempre determinados para os intervalos de comprimentos de onda relativos à região do visível, uma vez que esta região espectral é mais influenciada pelas condições atmosféricas em relação à região do infravermelho.



TABELA 4.14 EXEMPLOS DE VETORES SKYL UTILIZADOS

	Dia 11 08:17:33	Dia 11 09:09:21	Dia 12 08:06:49	Dia 14 10:30:40	Dia 15 08:43:10
0,40	34,70	24,67	37,34	58,78	21,76
0,41	33,38	23,56	35,53	58,52	20,42
0,42	31,79	23,33	33,66	58,01	19,05
0,43	30,22	21,17	31,84	57,24	17,75
0,44	28,81	20,09	30,17	56,65	16,58
0,45	27,85	19,39	28,99	56,40	15,80
0,46	26,61	18,47	27,48	56,02	14,78
0,47	25,67	17,80	26,40	55,61	14,10
0,48	24,61	17,01	25,11	55,10	13,26
0,49	23,49	16,23	24,12	54,49	12,44
0,50	22,79	15,72	22,97	54,30	11,91
0,51	21,85	15,05	21,88	53,64	11,27
0,52	21,17	14,61	21,11	53,06	10,85
0,53	20,40	14,05	20,14	52,70	10,32
0,54	19,81	13,63	19,44	53,31	9,92
0,55	19,00	13,09	18,57	51,57	9,42
0,56	18,46	12,70	17,94	51,31	9,08
0,57	17,73	12,15	17,11	50,86	8,58
0,58	17,20	11,76	16,56	50,21	8,25
0,59	16,52	11,31	15,87	49,69	7,82
0,60	16,11	11,06	15,39	49,45	7,52
0,61	15,55	10,69	14,78	49,80	7,31
0,62	15,14	10,39	14,32	48,13	7,05
0,63	14,71	10,12	13,88	47,28	6,81
0,64	14,24	9,80	13,40	46,93	6,50
0,65	13,89	9,55	13,02	46,70	6,29
0,66	13,46	9,29	12,56	46,09	6,06
0,67	13,13	9,08	12,33	45,75	5,88
0,68	12,81	8,86	11,93	45,61	5,71
0,69	12,52	8,63	11,64	45,45	5,56
0,70	12,42	8,62	11,54	45,41	5,59
0,71	12,33	8,60	11,48	45,44	5,67
0,72	12,30	8,59	11,54	44,63	5,79
0,73	12,36	8,81	11,56	44,28	6,00
0,74	12,47	9,06	11,57	44,62	6,22
0,75	12,43	9,04	11,51	45,14	6,27
0,76	12,24	8,97	11,41	44,22	6,23
0,77	12,17	9,02	11,34	45,39	6,22
0,78	12,08	8,98	11,29	45,48	6,21
0,79	11,99	8,95	11,27	44,77	6,15
0,80	11,99	8,91	11,29	44,26	6,13
0,81	11,93	8,86	11,31	42,65	6,06
0,82	11,95	8,91	11,33	42,07	6,10
0,83	11,96	9,06	11,26	42,30	6,11
0,84	11,98	9,16	11,32	42,42	6,12
0,85	11,70	9,32	11,35	41,72	6,21
0,86	12,22	9,35	11,41	41,30	6,24
0,87	12,19	9,48	11,47	41,34	6,29
0,88	12,40	9,54	11,67	41,97	6,35
0,89	12,81	9,71	12,28	42,07	6,61
0,90	13,31	9,98	12,94	41,52	6,94

#### 4.4 VALORES MEDIDOS DE REFLECTÂNCIA (VMR) X VALORES CALCULADOS DE REFLECTÂNCIA (VCR)

Cada IFOV definido sobre os canteiros foi caracterizado espectralmente em diversas situações de iluminação e visada, através das medições radiométricas conduzidas no experimento de campo. Os resultados destas medições foram dispostos na

forma de vetores contendo os VMRs para 51 intervalos de comprimentos de onda contidos de  $0,4\mu\text{m}$  a  $0,9\mu\text{m}$ . Uma vez que para cada um destes vetores foram determinados os VCRs referentes às mesmas condições de iluminação e visada, para os mesmos valores dos parâmetros biofísicos e espectrais contidos em cada IFOV, procedeu-se a comparação entre ambos através de um pareamento de vetores VMRs x VCRs. Esta comparação foi realizada para avaliar o desempenho do modelo.

A seguir são apresentados os resultados da comparação mencionada para cada dossel, considerando diferentes condições de iluminação e visada.

#### 4.4.1 Eucalipto

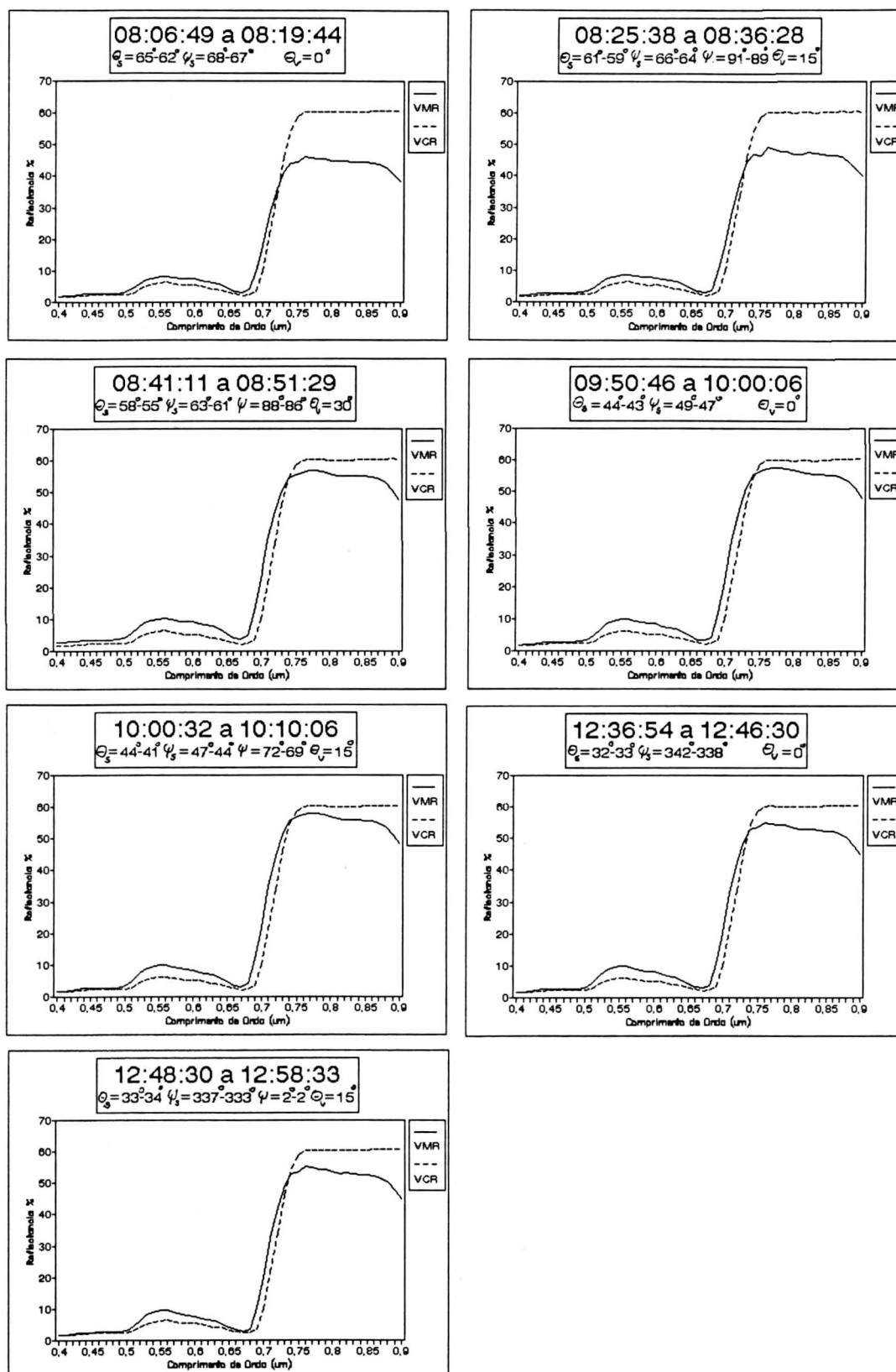
A Figura 4.5 apresenta os gráficos dos VMRs e seus respectivos VCRs médios, para cada situação de iluminação e visada considerada na coleta de dados radiométricos deste dossel.

Os valores angulares apresentados nos gráficos desta Figura 4.5 referem-se às geometrias de iluminação e de visada. O ângulo azimutal de visada ( $\psi_v$ ) foi excluído, uma vez que foi mantido fixo ( $335^\circ$ ) para todas as situações, sendo substituído pelo azimute relativo entre o Sol e o sensor ( $\psi$ ).

No Apêndice C encontram-se os valores do Coeficiente de Variação destes vetores médios, para toda a amplitude espectral considerada ( $0,40\mu\text{m}$  a  $0,90\mu\text{m}$ ).

O IAF médio do dossel de Eucalipto foi de 3,70 e o ângulo médio de inclinação das folhas foi de  $18^\circ$ , o que o caracterizou como um dossel denso e do tipo planófilo.

FIGURA 4.5 VMR X VCR PARA O DOSSEL DE EUCALITPO



Considerando os horários nos quais foram realizadas as medições radiométricas neste dossel, a geometria de iluminação foi caracterizada por valores de  $\theta_s$  que variaram de  $65^\circ$  (valor máximo) à  $32^\circ$  (valor mínimo). Os valores do azimute relativo entre o Sol e o sensor ( $\psi$ ) indicaram que as visadas oblíquas ( $\theta_v = 15^\circ$  e  $30^\circ$ ) deram-se quase que perpendicularmente ( $\psi = 91^\circ$  à  $86^\circ$ ) à incidência da REM solar nos primeiros horários da manhã, e tenderam para uma direção oposta à de retroespalhamento nos horários de 12:36:54h à 12:58:33h.

Para os três horários iniciais da manhã (08:06:49h à 08:51:29h) foi verificada uma variação relativamente pequena da geometria da iluminação solar. Em cada um dos três horários em questão, os dados foram coletados sob diferentes valores de  $\theta_v$  ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$ , respectivamente). Desprezando então os efeitos da variação da geometria de iluminação neste período de tempo, as diferenças entre as reflectâncias do dossel foram devidas à variação dos valores de  $\theta_v$ . Assim, para as regiões do visível e infravermelho, foi verificada um aumento (26% para a região do azul, 25% para a região do verde, 23% para a região do vermelho e 24% para a região do infravermelho), da reflectância do dossel (valores de VMR) com o aumento de  $\theta_v$ . Este resultado foi coerente com as afirmações de KRIEBEL (1978) e BRAKKE e OTTERMAN (1990) referentes ao efeito das variações de  $\theta_v$  sobre a reflectância de um dossel, em condições de iluminação semelhantes àquelas destes três horários em questão.

As reflectâncias calculadas pelo modelo (VCRs), ainda para estes três horários, apresentaram tendências contrárias,

ou seja, de diminuição dos valores dos VCRs com o aumento de  $\theta_v$  como já apresentado nos resultados da análise de sensibilidade do modelo. Destacando-se ainda as amplitudes de variação dos VCRs, que quando comparadas com aquelas dos VMRs, podem ser consideradas pequenas.

Na região do verde ( $0,52\mu\text{m}$  à  $0,60\mu\text{m}$ ) esse aumento de 25% da reflectância pode ser explicado pelo fato de que, neste dossel de Eucalipto, as folhas mais jovens, localizadas nas camadas superiores do dossel, apresentavam uma tonalidade mais escura e tendendo para o vermelho. As folhas mais velhas estavam localizadas nas camadas mais inferiores e apresentavam uma tonalidade verde clara. Com o aumento dos valores de  $\theta_v$ , foi possível a visualização destas folhas mais velhas, em relação à visada vertical ( $\theta_v=0^\circ$ ).

Analizando agora os VMRs dos dois horários subseqüentes (09:5:46h à 10:10:06h), verificou-se que estes VMRs foram bastantes semelhantes àqueles determinados para o horário de 08:41:11h à 08:51:29h, para  $\theta_v = 30^\circ$ . Uma vez que entre os três primeiros horários da manhã e os dois horários agora em questão houve alterações na geometria de iluminação, e que entre estes últimos a variação de  $\theta_v$  parece não ter alterado a reflectância do dossel, as variações na geometria de iluminação podem explicar o aumento da reflectância medida do dossel.

Para a região do visível, estes resultados concordaram com aqueles apresentados por JACKSON et al (1979) e WANJURA e HATFIELD (1988) sobre o efeito da geometria de iluminação sobre a reflectância de um dossel, quando observado

verticalmente ( $\theta_v = 0^\circ$ ). A pouca variação identificada entre os VMRs nesta região espectral pode ser explicada pela grande densidade do dossel de Eucalipto. RANSON et al. (1986) mencionaram que dosséis densos apresentam menores variações em sua reflectância espectral quando comparado com dosséis mais esparsos.

Na região do infravermelho foi detectado um aumento de 14% na reflectância do dossel nos horários compreendidos entre 09:50:46h à 10:10:06h, em relação aos três primeiros horários da manhã, o que foi interpretado como um resultado não concordante com as afirmações de TUCKER (1977) referentes ao aumento da reflectância do dossel com o aumento dos valores de  $\theta_s$ . Como pode ser verificado na Figura 4.5, os valores de  $\theta_s$  diminuíram, mas a reflectância do dossel aumentou. Isso pode ser explicado pela presença de orvalho em maior quantidade nos primeiros horários da manhã e sua gradual evaporação durante o dia, até seu completo desaparecimento nos horários próximos às 10:30h. PINTER e JACKSON (1981) relataram o efeito do orvalho sobre a radiância de dosséis de culturas agrícolas nesta região espectral. Os autores concluíram que a presença do orvalho na superfície das folhas tendeu à diminuir a reflectância espectral do dossel, o que o tornou um agente complicador da análise da dinâmica dessa reflectância. Com a evaporação do orvalho, a reflectância do dossel na região do infravermelho tendeu à aumentar.

Para os dois últimos horários (12:36:54h à 12:58:33h) foi verificada uma tendência de diminuição na reflectância do dossel, em ambas as regiões espectrais. Em tratando-se de um

dossel denso, segundo RANSON et al. (1986), não deveriam ser verificadas grandes variações na reflectância do dossel nestas regiões espectrais com as variações de  $\theta_s$  e de  $\theta_v$ , o que foi realmente constatado. A tendência de diminuição mais evidente para  $\theta_v = 15^\circ$ , pode ser atribuída à variação de  $\psi$  que conferiu a esta visada uma observação frontal ao Sol, ou seja, oposta à direção de retroespalhamento. Estes últimos autores e JACKSON et al (1979) comentaram que, em uma condição de visada semelhante a esta, a diminuição da reflectância pode ser explicada pela maior visualização de sombras no dossel, mesmo para dosséis densos.

Comparando os coeficientes de variação dos VMRs com aqueles dos VCRs, apresentados nas tabelas contidas no Apêndice C, verificou-se que os primeiros foram sempre maiores do que os coeficientes de variação dos VCRs, em todos os horários e intervalos de comprimento de onda. Este resultado indicou que os VMRs foram mais heterogêneos entre si, quando comparados com seus respectivos VCRs. Essa maior heterogeneidade comprovou a menor sensibilidade do modelo em relação à variação dos parâmetros influentes na reflectância espectral de dosséis, quando comparado com os resultados das medições radiométricas. Ainda, o modelo não levou em consideração os possíveis efeitos de fatores como o orvalho, os quais foram detectados na dinâmica dos VMRs, ou de ventos, que apesar de não ter sido possível sua detecção, pode ser exercido influência durante as medições radiométricas. LORD et al. (1985) relataram o efeito do vento sobre a orientação espacial de folhas de culturas agrícolas e suas consequências

sobre a reflectância espectral de seus dosséis, normalmente alterando aleatoriamente a DAF no momento de coleta dos dados radiométricos, ora expondo, ora ocultando o solo.

Como mencionado anteriormente o parâmetro usado para medir o ajuste entre os VMRs e VCRs foi o RQMP. A Tabela 4.15 apresenta os valores de RQMP calculados para cada uma das bandas do espectro (azul, verde, vermelho e infravermelho).

A análise dos dados contidos nesta tabela pode ser conduzida no sentido de avaliar o desempenho do modelo em cada horário individualmente, atendo-se portanto aos valores de RQMP determinados para cada banda, ou ainda no sentido de avaliar esse desempenho em cada banda nos diversos horários. Essas duas considerações são apresentadas a seguir.

TABELA 4.15 VALORES DE RQMP PARA O DOSSEL DE EUCALIPTO

HORÁRIO	$\Theta_V$	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
		Azul	Verde	Vermelho	Infravermelho
08:06:49	0°	0,890714	2,916910	1,280502	8,076651
08:25:38	15°	0,945606	3,249795	1,269121	5,881227
08:41:11	30°	1,434821	4,487726	1,503576	2,536975
09:50:46	0°	0,954166	3,563614	1,308241	2,157125
10:00:32	15°	0,925785	3,466644	1,288755	2,138095
12:36:54	0°	0,870660	3,164361	1,244702	3,271291
12:48:30	15°	0,780498	2,792824	1,182446	3,318926

Considerando a primeira possibilidade, pode-se verificar que a bandas de absorção da REM por parte dos elementos da vegetação (bandas 1 e 3) apresentaram os menores valores de RQMP, relativamente às demais bandas, indicando que os VCRs determinados pelo modelo nestas regiões espectrais apresentaram-se mais próximos de seus respectivos VMRs, ou seja, o modelo atingiu melhores desempenhos nestas bandas. Na



banda 2, referente à região do verde, os valores de RQMP apresentaram-se ligeiramente mais elevados do que aqueles determinados nas bandas 1 e 3, indicando uma distância maior entre os VCRs e VMRs relativos a esta região espectral, e portanto um pior desempenho do modelo. Para a banda 4 (infravermelho próximo) os VCRs apresentaram-se ainda mais distantes dos VMRs, uma vez que os valores de RQMP foram relativamente os mais elevados, indicando os piores desempenhos do modelo. Este resultado pode ser melhor visualizado através da observação da Figura 4.5. Notou-se que em todos os horários os VCRs encontram-se mais próximos de seus respectivos VMRs nas regiões referentes às bandas 1 e 3. Na banda 2, verificou-se que as curvas tenderam a distanciarem-se. Na região do infravermelho próximo, as curvas apresentaram um máximo de distanciamento.

Estes resultados podem ser explicados levando em consideração aqueles alcançados por GAUSMAN et al. (1973) nos quais foi comprovada a menor amplitude de variação da reflectância espectral de folhas de vinte espécies de culturas agrícolas, relativa ao comprimento de onda de  $0,55\mu\text{m}$  (verde). Segundo estes autores, as maiores amplitudes relativas de variação desta reflectância foram encontradas para o comprimento de onda de  $1,0\mu\text{m}$  (infravermelho próximo). Aliado a isso, deve-se levar em consideração estas amplitudes em termos absolutos. Assim, as variações esperadas entre as reflectâncias de folhas de diferentes espécies, para a região do visível, serão menores do que estas variações para a região do infravermelho.

Isto explica a maior proximidade entre os VMRs e seus respectivos VCRs nas regiões de maior absorção da REM por parte da vegetação, pois o modelo teve uma "chance" maior de determinar valores de reflectância mais próximos àqueles medidos, uma vez que as variações, em termos absolutos, para estas regiões foram e geralmente serão menores.

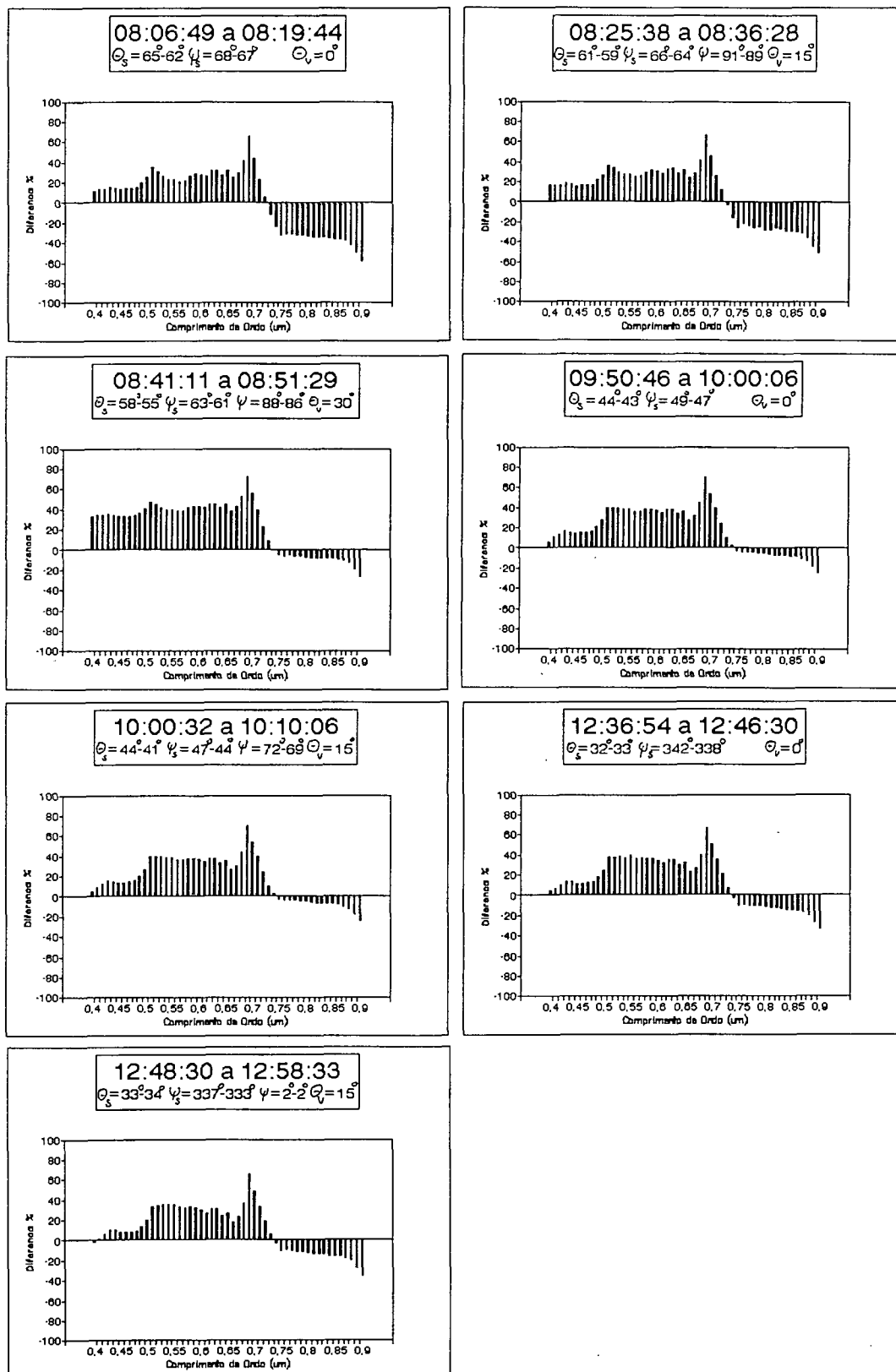
Outro aspecto que deve ser levado em consideração refere-se à maior sensibilidade do modelo em relação às variações da reflectância e da transmitância hemisféricas das folhas ( $\rho$  e  $\tau$ ). Graças a esta maior sensibilidade, os VCRs apresentaram-se muito mais próximos da reflectância hemisférica das folhas (vide Figura 4.4), a despeito dos demais parâmetros que exerceram influência sobre a reflectância do dossel. Através da análise das curvas de todos os VCRs e daquela referente à reflectância hemisférica das folhas de Eucalipto, verificou-se que, na região do visível, essa reflectância do dossel foi "reduzida" e na região do infravermelho esta foi "acrescida" pelo modelo. O que foi coerente com as afirmações de KUMAR (1972) e GOEL (1988) sobre as diferenças entre as reflectâncias das folhas e de um dossel que as contém.

A Figura 4.6 apresenta a representação gráfica das diferenças entre VMRs e VCRs para os horários de medições radiométricas, onde podem ser melhor visualizados os desempenhos do modelo para cada intervalo de comprimento de onda.

A análise dos gráficos contidos nesta figura permitiu constatar que as diferenças entre os VMRs e seus respectivos

VCRs frequentemente excedeu valores de 40%.

FIGURA 4.6 DIFERENÇAS ENTRE VMR E VCR PARA O DOSSEL DE EUCALIPTO



Considerando agora a segunda possibilidade de análise dos dados contidos na Tabela 4.15, verificou-se que, para as bandas referentes à região do visível, os valores de RQMP aumentaram até o horário de 08:41:11h, a partir do qual diminuíram até atingirem valores mínimos no horário de 12:48:30h. Na banda 4 os valores de RQMP foram decrescentes até o horário de 10:00:32h, a partir do qual tornaram a aumentar.

Nos três primeiros horários da manhã, nos quais houve pouca alteração da geometria de iluminação, a queda do desempenho do modelo na região do visível com o aumento dos valores de  $\Theta_V$ , comprovou a pouca sensibilidade do modelo em relação às variações deste ângulo. Para a região do infravermelho, a melhoria do desempenho do modelo foi proporcionada pelo aumento dos valores da reflectância do dossel (VMRs) em decorrência da visada mais oblíqua. Esse aumento promoveu a aproximação entre os VMRs e seus respectivos VCRs.

Para os horários subseqüentes (09:50:46h à 10:10:06h), verificou-se que os valores de RQMP referentes às bandas 1, 2 e 3 foram semelhantes àqueles encontrados para os dois primeiros horários da manhã (08:06:49h à 08:36:28h), cujos dados foram também obtidos com  $\Theta_V$  iguais à  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , respectivamente. Este resultado apontou para uma comprovação do efeito de  $\Theta_V = 30^\circ$  sobre a reflectância do dossel determinada no horário de 08:41:11h à 08:51:29h.

Na região do infravermelho os valores de RQMP foram menores do que aqueles determinados nos dois primeiros

horários da manhã, devido ao aumento da reflectância do dossel causado provavelmente pela evaporação do orvalho. Em realidade o que foi verificado aqui foi uma aproximação dos VMRs com seus respectivos VCRs e não o contrário.

Nos dois últimos horários (12:36:54h à 12:58:33h) os valores de RQMP apresentaram uma diminuição na região do visível, indicando que no horário de 12:48:30h à 12:58:33h o modelo alcançou seu melhor desempenho devido à maior aproximação entre os VMRs e os VCRs.

#### 4.4.2 Peroba

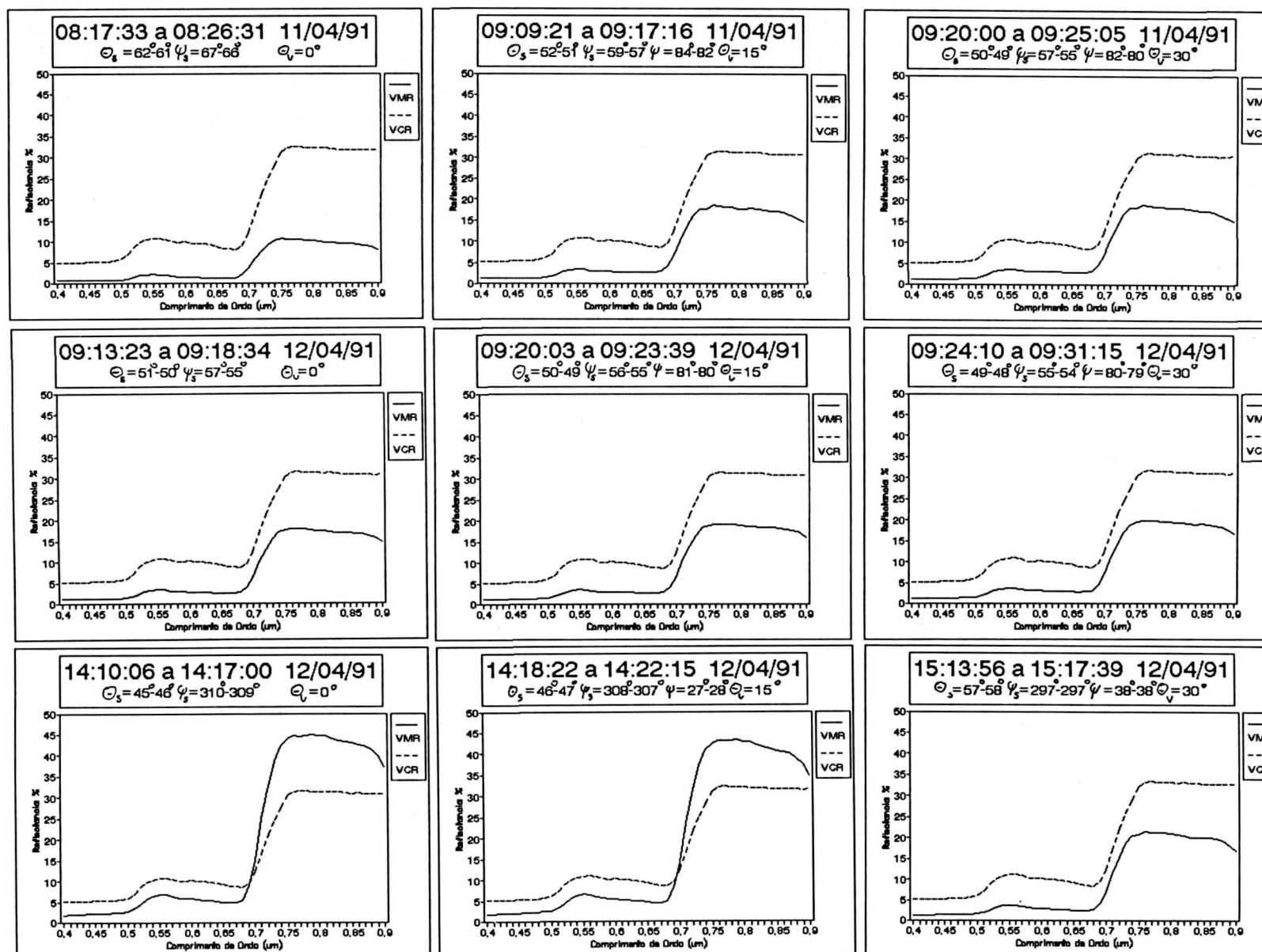
A Figura 4.7 apresenta os gráficos referentes aos VMRs e VCRs médios referentes ao dossel de Peroba.

A existência de horários muito próximos entre si pode ser explicada pelo fato de que as medições radiométricas foram realizadas em dias diferentes (11 e 12/04/91).

O IAF médio deste dossel de Peroba foi igual a 0,60, e como pode ser observado na Figura 3.4, as plantas foram dispostas em fileiras equidistantes facilmente perceptíveis.

Considerando inicialmente os resultados obtidos no dia 11/04 /91 e os três primeiros e únicos horários de medições radiométricas (08:17:33h à 09:25:05h), verificou-se que entre o primeiro destes horários e o segundo, houve um intervalo de uma hora entre as coletas de dados, o que acarretou a modificação na geometria de iluminação. Assim, as diferenças entre os VMRs destes primeiros horários e aqueles referentes aos dois horários subseqüentes não pode ser atribuído exclusivamente às variações de  $\theta_v$ .

FIGURA 4.7 VMR x VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA



Para as regiões do visível e infravermelho os valores mínimos de reflectância do dossel foram determinados no primeiro horário, ou seja, numa situação de iluminação mais oblíqua (maior  $\theta_s$ ). JACKSON et al. (1979) e RANSON et al. (1986) afirmaram que em geometrias de iluminação semelhantes a esta e visada vertical ( $\theta_v = 0^\circ$ ), o sombreamento entre as fileiras torna-se máximo, o que acarreta uma diminuição nos valores de reflectância do dossel relativa à região do visível. Para a região do infravermelho JACKSON et al. (1979) afirmaram que esse efeito não é tão pronunciado. Segundo RANSON et al (1986), com o aumento da elevação solar e conseqüente diminuição do valor de  $\theta_s$ , a tendência da reflectância do dossel é aumentar na região do visível e diminuir na região do infravermelho. Os resultados alcançados nos dois horários subseqüentes ao primeiro horário deste dia 11/04/91 comprovaram estas afirmações para a região do visível, mas seguiram uma tendência oposta na região do infravermelho.

Uma vez que a geometria de iluminação sofreu uma variação significativa entre o primeiro horário e os dois horários seguintes, o efeito de  $\theta_v$  pode explicar o aumento da reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais somente nestes dois últimos horários em questão. BRAKKE e OTTERMAN (1990) verificaram que o aumento de  $\theta_v$  acarretou no aumento da reflectância de dosséis de culturas agrícolas nas regiões do visível e infravermelho.

Os resultados alcançados no dia 12/04/91, para os três horários da parte da manhã (09:13:23h à 09:31:15h), foram

semelhantes àqueles obtidos no dia anterior, destacando-se o menor período de tempo empreendido entre as coletas de dados radiométricos, o que acarretou na minimização da alteração da geometria de iluminação. Desta forma, foi possível verificar o efeito do aumento dos valores de  $\theta_v$  sobre a reflectância do dossel, tendendo à elevá-la.

A orientação espacial das fileiras das plantas deste dossel de Peroba foi coincidente com o alinhamento do canteiro (Azimute do canteiro =  $335^\circ$ ), estando as plantas eqüidistantes uma das outras. Este fato pode explicar os baixos valores da reflectância do dossel determinados nos horários matutinos nos dois dias mencionados. Para estes horários os VCRs não apresentaram as mesmas magnitudes de variação, mantendo-se sempre superiores aos seus respectivos VMRs. Isto pode ser explicado pela já mencionada pouca sensibilidade do modelo em relação às variações dos parâmetros biofísicos, de iluminação e de visada e à sua maior sensibilidade em relação às variações de  $\rho$  e  $\tau$ .

Comparando a curva de reflectância hemisférica da folha de Peroba apresentada na Figura 4.4, com as curvas dos VCRs apresentadas na Figura 4.7, constatou-se que o modelo apresentou os VCRs mais próximos aos valores de  $\rho$ .

Nos horários de 14:10:06h à 14:22:15h, foram identificados os maiores valores de reflectância para o dossel de Peroba, em toda a amplitude espectral considerada, sendo que entre estes dois horários não foi considerada a alteração da geometria de iluminação devido à proximidade temporal entre eles. Na região do infravermelho os VMRs chegaram a exceder os



VCRs.

Nestes horários os valores de  $\psi$  foram mínimos, enquanto que os valores de  $\theta_s$  apresentaram-se muito próximos daqueles obtidos em horários próximos às 09:30h. Para esta situação geométrica de iluminação e visada vertical (14:10:06h à 14:17:00h) o solo foi mais sombreado, uma vez que as sombras foram mais projetadas entre as plantas, mantendo um maior número de folhas iluminadas. Com isso, o efeito do solo, que nos horários da manhã dominou o sinal captado pelo sensor (radiômetro) em cada IFOV devido ao maior sombreamento das plantas, foi minimizado, acarretando o aumento da reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais. Aliado à isso, houve ainda a evaporação do orvalho, que nestes horários era totalmente inexistente.

A visada com  $\theta_v = 15^\circ$ , para o horário de 14:18:22h à 14:22:15h, acarretou uma ligeira diminuição na reflectância do dossel na região do infravermelho em relação a  $\theta_v = 0^\circ$  para o horário das 14:10:06h à 14:17:00h. Isto foi coerente com os resultados alcançados por RANSON et al. (1986) e BRAKKE e OTTERMAN (1990) referentes à dinâmica da reflectância de um dossel em relação ao aumento de  $\theta_v$ .

Para o horário de 15:13:56h à 15:17:39h foi verificada uma diminuição na reflectância do dossel em toda a amplitude espectral considerada. Neste horário devem ser considerados os efeitos das geometrias de iluminação e de visada. Entre este horário e os dois que o antecederam, houve uma diferença de aproximadamente 50 minutos. Este período de tempo foi suficiente para promover uma alteração de aproximadamente  $10^\circ$

em  $\Theta_s$  e em  $\psi_s$ . Ainda neste último horário,  $\Theta_v$  foi igual à  $30^\circ$ , com  $\psi$  igual à  $38^\circ$ , em direção oposta ao retroespalhamento. Comparando esta geometria de iluminação com aquela do horário de 08:17:33h à 08:26:31h, verificou-se que ambas foram semelhantes, diferindo-se somente em  $\psi$ .

Devido aos valores novamente elevados de  $\Theta_s$ , as plantas voltaram a ser sombreadas no sentido da diagonal ao canteiro, aliado ainda à visada oposta ao retroespalhamento, tendendo então a diminuir os valores da reflectância do dossel (48% em relação aos horários anteriores, próximos às 14:00 h).

A demora entre as coletas de dados radiométricos realizadas neste horário das 15:13:56h à 15:17:39h e nos dois outros horários que o antecederam foi devido à execução de uma rega accidental no canteiro que continha o dossel de Peroba. Diante de condições atmosféricas favoráveis, optou-se por realizar as medições radiométricas, mesmo estando as folhas cobertas por água. A presença de gotículas de água na superfície das folhas pode também ter contribuído para a diminuição da reflectância do dossel na região do infravermelho.

Como pode ser verificado na Figura 4.7, os VCRs não apresentaram as mesmas amplitudes de variação em todos os horários, o que comprovou os resultados alcançados na análise de sensibilidade.

No Apêndice D encontram-se as Tabelas referentes aos coeficientes de variação dos VMRs e VCRs médios do dossel de Peroba. Verificaram-se os mesmos resultados encontrados para o dossel de Eucalipto, com os valores dos coeficientes de

variação dos VMRs sempre superiores aos coeficientes de variação dos seus respectivos VCRs, indicando uma maior heterogeneidade dos VMRs em relação aos VCRs.

A Tabela 4.16 contém os RQMP determinados para cada banda e em cada horário de medição radiométrica.

TABELA 4.16 VALORES DE RQMP PARA O DOSSEL DE PEROBA

HORARIO	$\theta_v$	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
		Azul	Verde	Vermelho	Infravermelho
08:17:33	0°	22,29989	33,45124	23,46388	32,76114
09:09:21	15°	13,46933	22,49426	11,86768	16,57025
09:20:00	30°	12,06133	20,03072	10,33950	12,55013
09:13:23	0°	14,22440	22,53691	12,90277	16,57025
09:20:03	15°	13,25913	20,89461	11,60475	15,00109
09:24:10	30°	12,60520	19,85140	11,05580	14,10329
14:10:06	0°	4,68474	5,66597	2,70606	5,75582
14:18:22	15°	5,14061	6,90130	3,22597	3,99145
15:13:56	30°	11,60877	20,61034	9,99946	10,58664

Da mesma forma como conduzida a análise destes valores de RQMP para o dossel de Eucalipto, fixando-se o horário, verificou-se que os valores mínimos de RQMP foram atingidos nas bandas 1 e 3, sendo detectado um ligeiro aumento destes valores na banda 2 e um aumento ainda maior na banda 4. Isto pode ser explicado pelas mesmas constatações de GAUSMAN et al. (1973) sobre as variações relativas entre os valores de reflectância espectrais de folhas de vinte espécies agrícolas. Como já mencionado anteriormente, em termos absolutos estas diferenças conferem à região do visível uma amplitude muito menor do que aquela referente à região do infravermelho. Assim, o modelo teve uma "chance" maior de determinar valores de reflectância mais próximos dos medidos em campo.

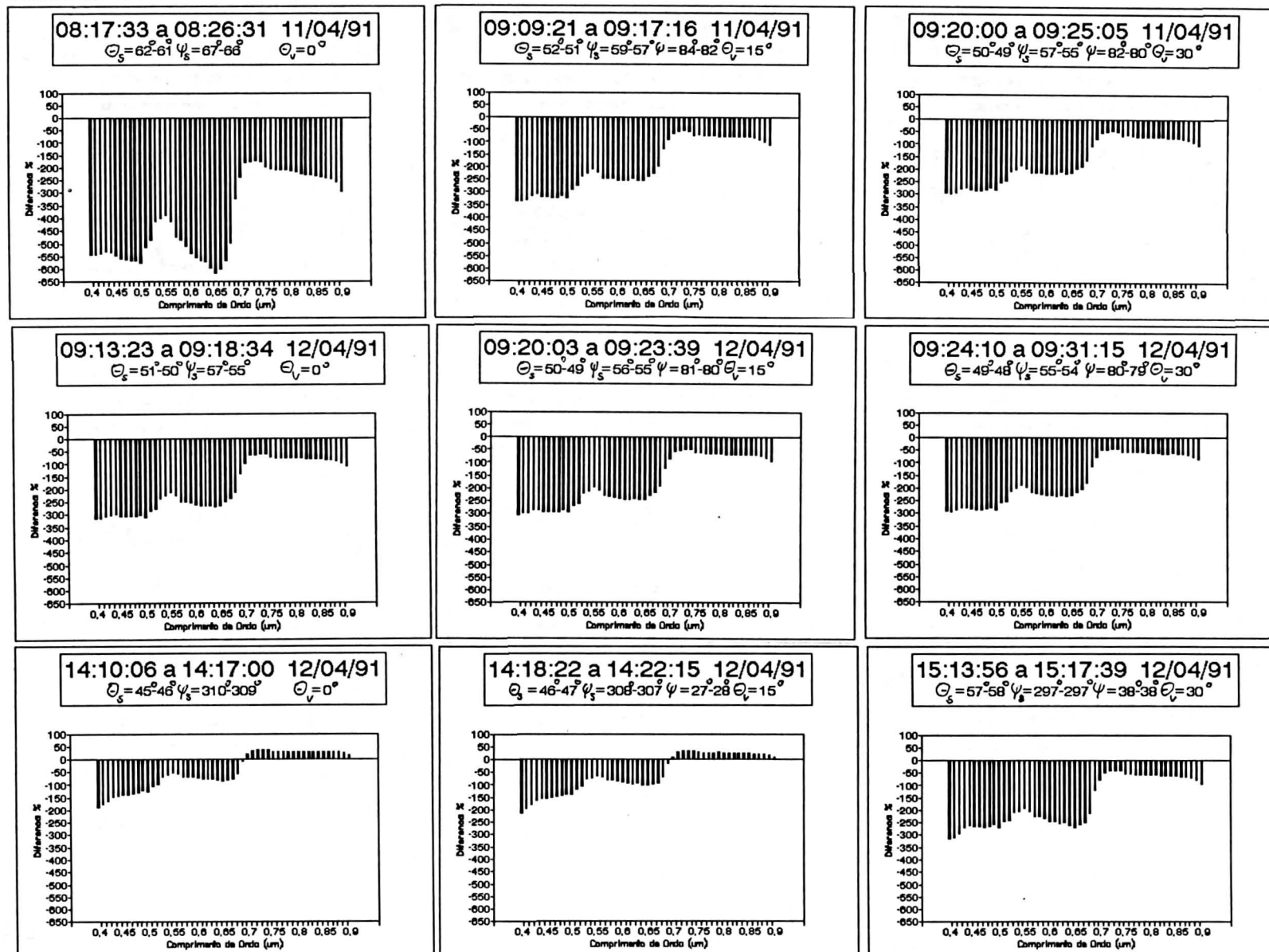
Analisando os valores de RQMP referentes a ambas as regiões espectrais, para os horários matutinos, verificou-se suas diminuições com o avançar das horas e com o aumento dos valores de  $\Theta_V$ . Isto foi devido à dinâmica da reflectância do dossel sob o efeito ora exclusivo da geometria de iluminação, ora de  $\Theta_V$  e finalmente devido à ação conjunta de ambas as geometrias. Uma vez que os VCRs não apresentaram a mesma magnitude de variação, o modelo atingiu seus melhores desempenhos (ou menos insatisfatórios) quando as folhas foram melhor iluminadas e, conseqüentemente, os VMRs aproximaram-se de seus respectivos VCRs.

O mesmo não foi verificado para os horários próximos às 14:00h, indicando que o aumento dos valores de  $\Theta_V$  distanciou ainda mais os VMRs de seus respectivos VCRs na região do visível. Para a região do infravermelho, o efeito de  $\Theta_V$  foi exatamente o contrário.

A Figura 4.8 apresenta os gráficos das diferenças relativas entre os dois valores (medidos e calculados) aonde os desempenhos do modelo podem ser melhor visualizados.

Verificou-se que as diferenças entre os VMRs e seus respectivos VCRs freqüentemente excederam os 100% para a maioria dos horários considerados, com exceção dos horários próximos às 14:00h.

FIGURA 4.8 DIFERENÇAS ENTRE VMR E VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA



#### 4.4.3 Peroba + Eucalipto

A Figura 4.9 apresenta os gráficos dos VMRs e VCRs médios calculados a partir dos mesmos 8 IFOVs do dossel de Peroba, contendo agora, além das mudas desta espécie, a mesma quantidade de mudas de Eucalipto, e considerando ainda o processamento dos programas SAIL e CANOPY.

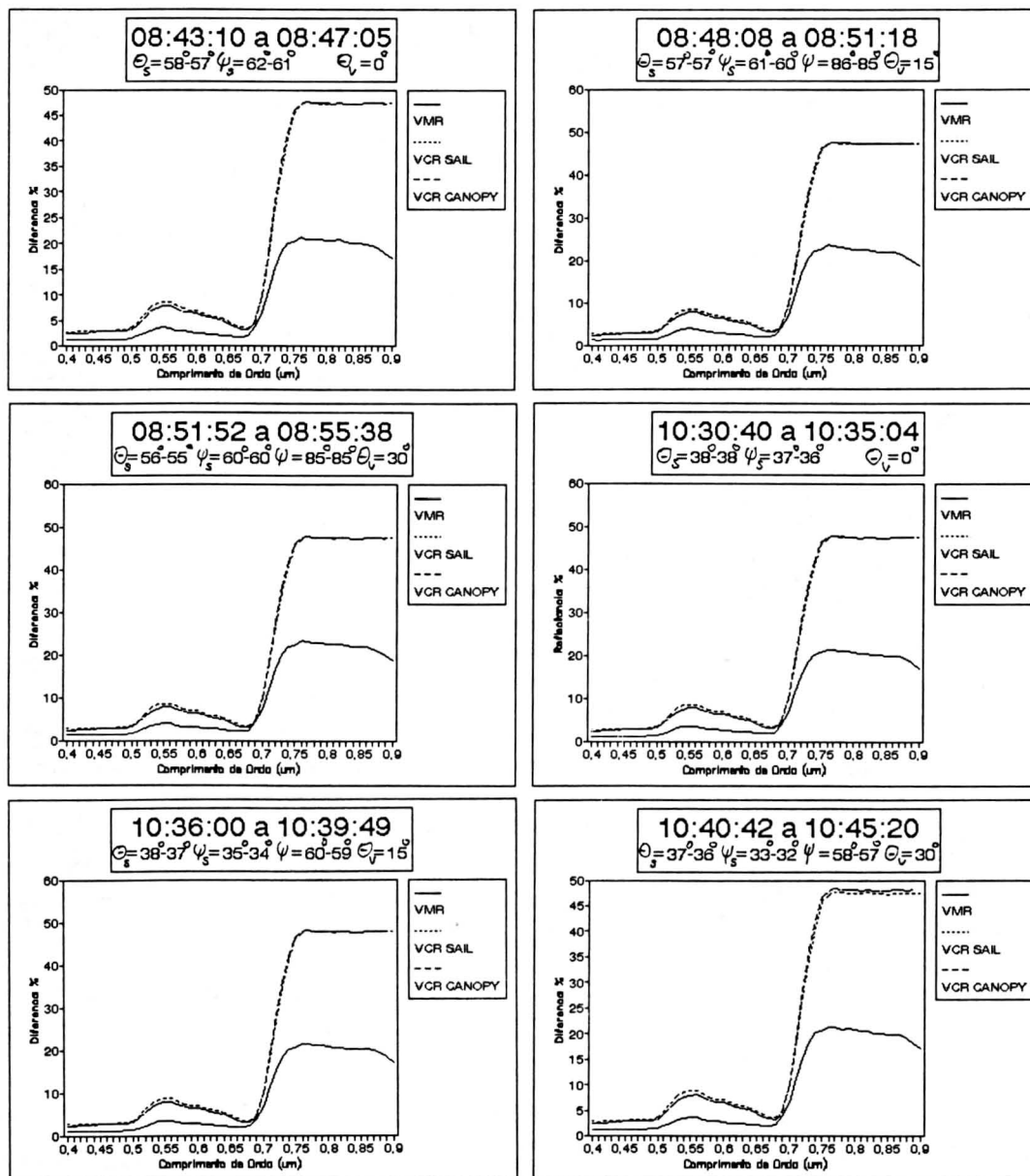
Considerando inicialmente os gráficos referentes aos horários de 08:43:10h à 08:55:38h, verificou-se que a reflectância do dossel foi superestimada em toda a amplitude espectral. Observando a representação gráfica de  $\rho$ , tanto das folhas de Peroba e de Eucalipto individualmente (utilizadas na versão CANOPY), quanto daquela referente à média de  $\rho$  das folhas de ambas as espécies (utilizada na versão SAIL) que foram apresentadas na Figura 4.4, constatou-se que o modelo, nas duas versões disponíveis, apresentou valores de reflectância do dossel muito próximos aos valores de  $\rho$ , tanto para a média entre  $\rho$  das folhas de ambas as espécies, quanto para  $\rho$  referente a cada uma delas individualmente. Isso explicou a superestimativa mencionada.

Nestes horários não foram identificadas alterações na geometria de iluminação, o que permitiu avaliar o efeito de  $\theta_v$  sobre a reflectância do dossel.

Como verificado nos dosséis anteriores de Eucalipto e de Peroba, o aumento de  $\theta_v$  acarretou também o aumento da reflectância do dossel na região do visível. Aqui, a iluminação deu-se quase que ortogonalmente ao sentido de inclinação de  $\theta_v$  ( $\psi = 87^\circ$  à  $85^\circ$ ), e ainda o IAF médio deste dossel de Peroba+Eucalipto foi igual à 1,91, com as mudas de

Eucalipto apresentando uma altura ligeiramente inferior (15 cm) àquela das mudas de Peroba, mas mantendo ainda a disposição nítida das fileiras.

FIGURA 4.9 VMR X VCR PARA O DOSSEL DE PEROBA+EUCALIPTO



A comparação destas curvas de reflectância apresentadas na Figura 4.9, com aquelas referentes à reflectância do dossel de Peroba (Figura 4.7), para os horários próximos a estes em questão (08:43:10h à 08:55:38h), permitiu constatar a minimização da contribuição do solo com o aumento de IAF, devido à caracterização da curva de reflectância da vegetação na região do visível e seu aumento na região do infravermelho.

TUCKER (1977) apresentou um trabalho que confirmou a diminuição da reflectância de dosséis na região do visível e seu aumento na região do infravermelho com o aumento do IAF. Os resultados obtidos aqui comprovaram estas afirmações na região do infravermelho. Na região do visível o resultados aparentemente contraditório podem ser explicados devido ao fato de que para o dossel de Peroba, o solo dominou o sinal captado pelo sensor em situações semelhantes de iluminação. Isto acarretou a diminuição na reflectância do dossel, descaracterizando a forma típica da reflectância da vegetação nesta região espectral. Com a inclusão das mudas de Eucalipto entre as mudas de Peroba, houve um maior recobrimento do solo, que passou a contribuir menos no sinal captado pelo sensor, dando lugar a uma maior contribuição das folhas.

Para os horários de 10:30:40h à 10:45:20h, o valor de  $\theta_s$  foi acrescido de aproximadamente  $20^\circ$  e  $\psi_s$  diminuiu também  $20^\circ$  em relação aos horários anteriores. A iluminação tendeu a ser mais perpendicular em relação ao topo do dossel e mais oblíqua em relação a orientação das fileiras. Esta alteração na geometria de iluminação não acarretou alterações significativas na reflectância do dossel, uma vez que as



curvas dos VMRs foram muito semelhantes entre si. Este resultado concordou com as afirmações de JACKSON et al. (1979) e RAO et al. (1979) sobre a menor variação da reflectância de dosséis mais densos com a alteração das geometrias de iluminação e de visada.

Para as variações de  $\rho_v$ , não foram constatadas tendências nos valores de reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais, nestes horários em questão.

Em todos os horários de realização de medições radiométricas deste dossel, não foram observadas as mesmas tendências na reflectância calculada pelo modelo daquelas verificadas pelos VMRs, indicando, mais uma vez, que o modelo, nas duas versões atribuiu em seu processamento um peso maior à reflectância hemisférica das folhas, em detrimento dos demais parâmetros que efetivamente exerceram influência na reflectância espectral do dossel.

No Apêndice E encontram-se os coeficientes de variação dos VMRs e de seus respectivos VCRs médios, considerando as duas versões do modelo. Verificou-se que os coeficientes de variação dos VMRs foram, de maneira geral, maiores do que os coeficientes de variação dos VCRs, com exceção de alguns intervalos de comprimento de onda na região do visível dos VCRs da versão CANOPY que apresentaram coeficientes de variação maiores do que os de seus respectivos VMRs, em todos os horários posteriores ao de 08:43:10h. Os resultados encontrados mostraram que a versão CANOPY do modelo SAIL apresentou uma maior variação dos valores de VCR, ou seja, uma maior heterogeneidade entre eles.

A Tabela 4.17 apresenta os valores dos RQMP determinados para cada banda, para todo o espectro e para cada horário, considerando os resultados obtidos pelo processamento de ambos os programas.

TABELA 4.17 VALORES DE RQMP PARA O DOSSEL DE PEROBA+EUCALIPTO

HORÁRIO	$\Theta_v$	BANDA 1		BANDA 2		BANDA 3		BANDA 4	
		SAIL	CANOPY	SAIL	CANOPY	SAIL	CANOPY	SAIL	CANOPY
08:48:10	0°	6,10006	5,08920	11,57902	9,80852	3,96960	3,44829	33,85685	33,92558
08:48:08	15°	5,16847	4,26643	9,76484	8,17001	3,25007	2,78216	25,67579	25,73439
08:51:52	30°	4,84102	3,95704	9,82776	8,15952	2,94001	2,47976	28,85354	28,88504
10:30:40	0°	6,13270	5,13989	10,96015	9,25783	3,69700	3,19965	33,21441	33,20592
10:36:00	15°	6,22409	5,22542	11,57470	9,79394	3,70000	3,19321	35,01325	35,06779
10:40:42	30°	6,37498	5,17441	11,51022	9,47178	3,98561	3,37112	32,45110	32,52251

Uma vez que os VCRs mantiveram-se praticamente inalterados em todos os horários, os valores de RQMP auxiliaram na análise da dinâmica da reflectância do dossel em questão.

Considerando os horários de 08:43:10h à 08:55:38h, para as bandas da região do visível, em ambas as versões, verificou-se que com o aumento de  $\Theta_v$ , os VMRs tenderam a ficar mais próximos de seus respectivos VCRs, o que comprovou a dinâmica da reflectância já discutida anteriormente para estes horários. Para a região do infravermelho, o desempenho do modelo foi melhor para  $\Theta_v = 15^\circ$ , o que indicou que o aumento da reflectância medida do dossel deu-se para esta condição de visada, voltando à diminuir para  $\Theta_v = 30^\circ$ .

Para os horários de 10:30:40h à 10:45:20h, não foram identificadas tendências no desempenho do modelo como aquelas identificadas para os horários anteriores, o que indicou a pouca variação da reflectância do dossel com a alteração das geometrias de iluminação e de visada.

A versão CANOPY proporcionou uma maior aproximação entre os VCRs e seus respectivos VMRs, o que indicou basicamente o efeito de se considerar a média entre as reflectâncias hemisféricas das folhas de Eucalipto e de Peroba (SAIL) e cada uma delas separadamente (CANOPY).

Pela análise da Figura 4.4, a reflectância média (Eucalipto + Peroba) apresentou valores compreendidos entre as reflectâncias hemisféricas de ambas as espécies. Tratou-se, portanto, de uma média aritmética. No processamento da versão CANOPY, as duas reflectâncias foram introduzidas separadamente e os cálculos foram conduzidos segundo critérios estabelecidos pelo modelo SAIL, que levou em consideração a contribuição destas duas reflectâncias sob ponto de vista físico, tendo sido sua influência considerada nas determinações dos coeficientes de espalhamento de extinção, que definiram o balanço e a trajetória da REM no interior do dossel (vide descrição da rotina SCR, no Apêndice A). Como consequência, os VCRs foram definidos com valores ligeiramente inferiores daqueles calculados pela versão SAIL, que, para os VMRs em questão, acarretou uma maior aproximação entre estes e seus respectivos VCRs.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam a representação gráfica das diferenças entre os VCRs e VMRs, para todos os

horários em questão, e que descrevem as considerações realizadas nos parágrafos anteriores.

FIGURA 4.10 DIFERENÇAS ENTRE VMR E VCR PARA DOSSEL DE PEROBA+ EUCALIPTO VIA VERSÃO SAIL

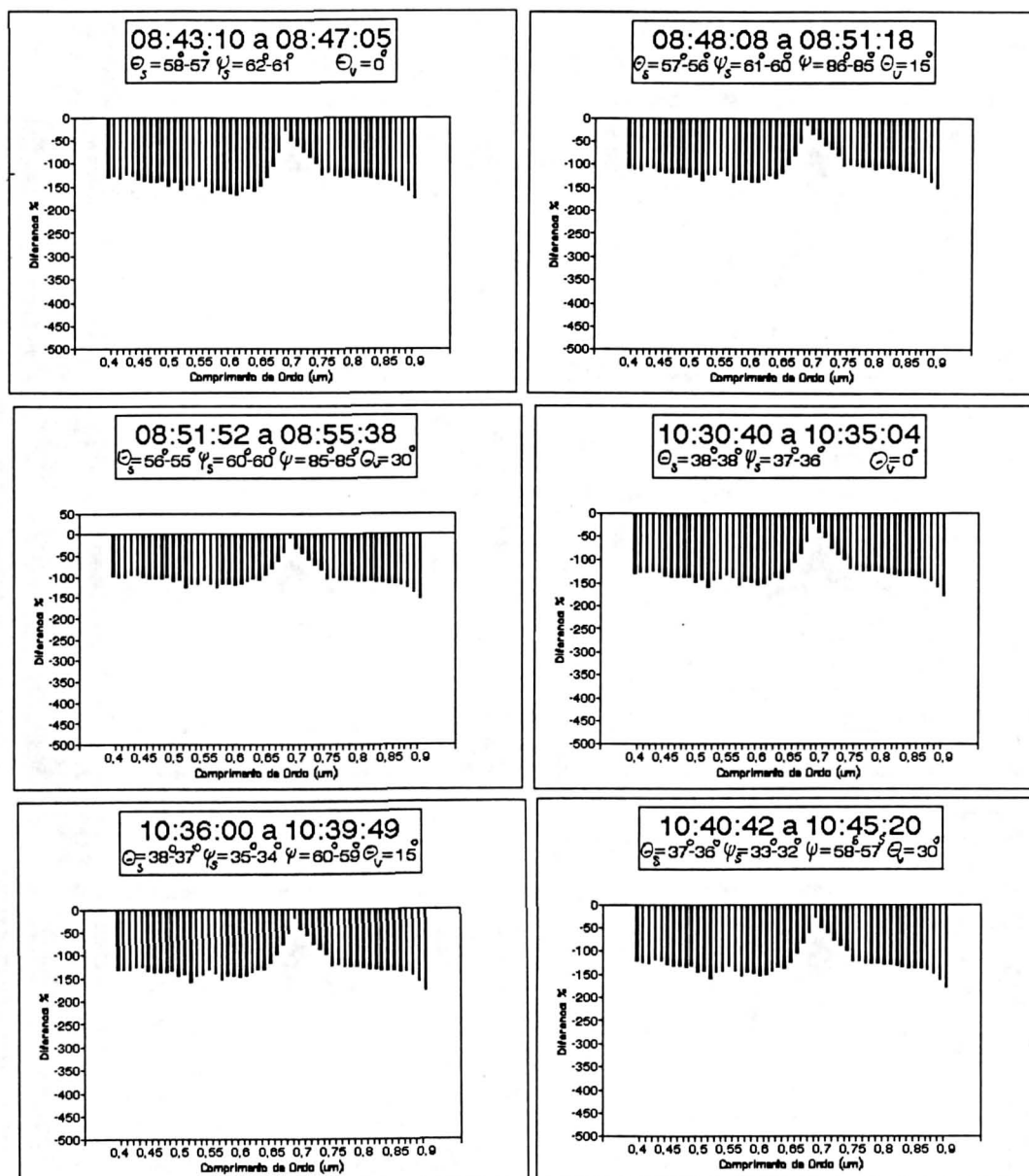
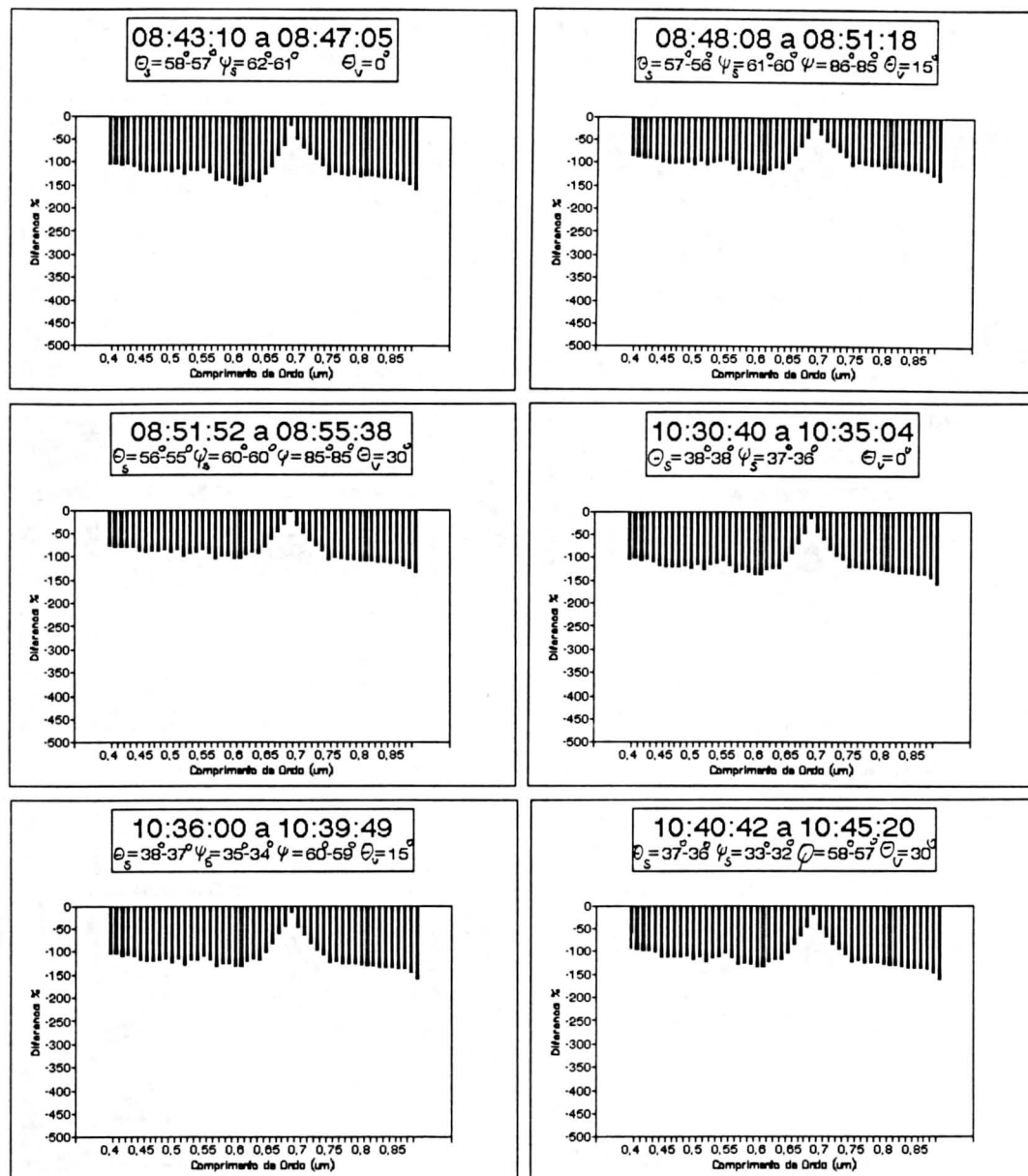


FIGURA 4.11 DIFERENÇAS ENTRE VMR E CVR PARA DOSSEL DE PEROBA+ EUCALITPO VIA VERSÃO CANOPY



## 4.5 ESTIMATIVA DE IAF ATRAVÉS DA INVERSÃO DO MODELO

As Tabelas 4.18, 4.19 e 4.20 contêm os resultados obtidos através da inversão do modelo visando a estimativa do IAF para cada um dos dosséis considerados. A coluna intitulada Função refere-se aos valores mínimos alcançados pela função mérito F.

TABELA 4.18 ESTIMATIVAS DE IAF PARA DOSSEL DE EUCALIPTO

Banda 1		Melhor Desempenho		Pior Desempenho	
IAF inic.	IAF est.	Função	IAF est.	Função	
0,5	1,295	3,568	0,734	4,622	
3	1,295	3,568	0,734	4,622	
5	1,295	3,568	0,734	4,622	
8	1,295	3,568	7,972	21,979	
10	9,937	5,595	10,006	21,979	
15	15,056	5,595	14,950	21,979	
Banda 2					
0,5	0,523	9,739	0,315	8,747	
3	0,523	9,739	0,315	8,747	
5	0,523	9,739	0,315	8,747	
8	0,523	9,739	0,315	8,747	
10	10,034	56,675	10,036	106,379	
15	14,994	56,675	14,994	106,379	
Banda 3					
0,5	1,320	7,959	0,935	3,240	
3	1,498	4,418	0,952	3,014	
5	1,498	4,412	0,952	3,014	
8	1,498	4,412	0,952	3,014	
10	10,000	8,048	10,022	33,097	
15	14,994	8,048	15,100	33,097	
Banda 4					
0,5	2,319	96,610	1,198	54,797	
3	2,319	96,610	1,198	54,797	
5	2,319	96,610	1,198	54,797	
8	2,319	96,610	1,198	54,797	
10	2,319	96,610	1,200	54,807	
15	2,319	96,610	1,198	54,797	

Para comparação das estimativas dos IAFs apresentados nestas tabelas foram utilizados os IAFs médios dos dosséis de Eucalipto, Peroba e Peroba+ Eucalipto, levando em consideração os IAFs de cada IFOV. Assim, foram utilizados os seguintes valores:

Eucalipto	==> IAF médio= 3,70
Peroba	==> IAF médio= 0,60
Peroba+Eucalipto	==> IAF médio= 1,91

Considerando primeiramente os dados contidos na Tabela 4.18, verificou-se que os valores estimados de IAF foram, de maneira geral, diferentes do IAF médio do dossel de Eucalipto, principalmente quando da utilização de um valor inicial para o IAF compreendido entre 0,5 e 8 para as bandas do visível e para todos os IAFs iniciais para a banda do infravermelho. Isto foi verificado em ambos os desempenhos do modelo.

Convém relembrar que para este dossel, os VMRs foram sempre superiores aos seus respectivos VCRs na faixa espectral correspondente ao visível. Assim, para que a função mérito fosse minimizada, ou seja, para que os VCRs se aproximassem dos VMRs, foi necessária uma diminuição do IAF para o aumento da reflectância calculada pelo modelo. Uma vez que para esta região espectral o ponto de saturação no qual não se verificam alterações na reflectância com o aumento (ou diminuição) do IAF encontra-se situado entre 2 e 3, foi necessária uma diminuição do IAF para valores inferiores a estes. Para as três bandas espectrais em questão esta diminuição foi verificada em ambos os desempenhos do modelo.

Notou-se ainda que, de maneira geral, para os valores iniciais de IAF acima de 8, os valores dos IAFs estimados foram maiores e o valor da função mérito foi também maior do que aquele atingido para os IAFs iniciais compreendidos entre 3 e 8. Este resultado indicou que quando o valor do IAF inicial foi alto, variações neste valor provocados pela subrotina de minimização da função em busca de seu valor mínimo, não acarretaram alterações nos VCRs e o procedimento finalizou determinando um valor mínimo para a Função Mérito diferente e sempre maior, o que foi coerente com os resultados atingidos na análise de sensibilidade do modelo.

Comparando os resultados obtidos entre o melhor e o pior desempenhos, ainda para a região espectral do visível, os valores dos IAFs estimados foram menores para as simulações considerando o pior desempenho, e para os valores iniciais de IAFs entre 0,5 e 8. Isto se deveu à maior "distância" entre os VMRs e os VCRs e a conseqüente diminuição mais pronunciada dos IAFs estimados, em relação àquelas promovidas para o melhor desempenho. Para os IAFs iniciais acima de 8, os valores estimados dos IAFs foram bastante semelhantes para os dois desempenhos, contudo os valores da função mérito foram muito diferentes, com valores substancialmente maiores determinados nas simulações conduzidas para o pior desempenho. Isto indicou que apesar das estimativas dos IAFs estarem próximas entre si para uma mesma banda espectral nos dois desempenhos, a "distância" mínima entre os VMRs e VCRs foi atingida quando o modelo obteve melhor desempenho.



Para a banda do infravermelho (banda 4) verificou-se uma pequena variação entre as estimativas de IAFs das simulações de um mesmo desempenho, não tendo sido constatada, portanto, a determinação de dois valores mínimos para a função mérito em função dos valores iniciais de IAF. Isto pode ser explicado pelo ponto de saturação que nesta região espectral encontra-se situado entre 6 e 8. Assim, mesmo atribuindo-se valores elevados de IAFs iniciais, alterações em torno destes valores, promovidos pela subrotina, foram insuficientes para promover alterações nos VCRs e assim estimar valores mínimos próximos para a função mérito. Vale salientar, que para o dossel de Eucalipto, os VMRs foram sempre inferiores aos seus respectivos VCRs nesta faixa espectral. Desta forma, para a minimização da função mérito, foi necessária a diminuição do IAF para "aproximar" os VCRs dos VMRs.

Para os dados contidos na Tabela 4.19, as interpretações são semelhantes àquelas apresentadas para os dados contidos na Tabela 4.18, contudo há de se considerar que para o dossel de Peroba os VMRs foram sempre inferiores aos VCRs em toda a amplitude espectral considerada ( $0,4\mu\text{m}$  a  $0,9\mu\text{m}$ ). Assim, verificou-se uma tendência ao aumento dos valores dos IAFs estimados nas bandas referentes à região do visível, com exceção da banda 2 quando os valores de IAF iniciais foram de 0,5 e 5, e uma diminuição destes valores para a banda referente ao infravermelho.

Outro aspecto a ser salientado aqui refere-se ao relativo pior desempenho do modelo para o dossel de Peroba, em todas as bandas espectrais e horários em relação àqueles

alcançados no dossel de Eucalipto (vide Tabelas 4.15 e 4.16). Desta forma esperava-se que as estimativas dos IAFs seriam ainda mais "distantes" dos valores reais, o que foi constatado de fato.

TABELA 4.19 ESTIMATIVAS DE IAF PARA DOSSEL DE PEROBA

Banda 1			Melhor Desempenho		Pior Desempenho	
IAF inic.	IAF est.	Função	IAF est.	Função		
0,5	15,650	55,162	16,375	162,662		
3	10,950	55,162	8,350	162,662		
5	7,606	55,162	7,350	162,662		
8	8,088	55,162	8,075	162,662		
10	10,009	55,162	9,938	162,662		
15	15,044	55,162	15,018	162,662		
Banda 2						
0,5	2,184	200,967	5,441	717,746		
3	2,188	200,968	5,044	717,746		
5	2,188	200,967	5,062	717,746		
8	8,049	201,047	8,025	717,747		
10	9,937	201,047	9,937	717,746		
15	15,026	201,047	15,073	717,747		
Banda 3						
0,5	11,450	37,842	19,225	153,739		
3	10,250	37,842	10,250	153,739		
5	7,743	37,842	11,350	153,739		
8	8,100	37,842	7,984	153,732		
10	9,994	37,842	9,992	153,739		
15	15,063	37,842	15,075	153,739		
Banda 4						
0,5	1,114	62,534	-0,252	1,245		
3	1,113	62,534	-0,252	1,245		
5	1,114	62,534	-0,252	1,245		
8	1,113	62,534	-0,252	1,245		
10	1,113	62,534	-0,252	1,245		
15	1,114	62,534	-0,252	1,245		

Ainda na Tabela 4.19, os valores de IAFs estimados para a banda 2 no melhor desempenho do modelo, quando da

consideração dos valores de IAFs iniciais de 0,5 e 5 (IAF= 2,184 e 2,188), foram também próximos do IAF médio e aparentemente constituíram as únicas exceções nesta região espectral na qual os VCRs deveriam diminuir para se aproximarem dos VMRs. Esta diminuição, como mencionado anteriormente, seria alcançada com o aumento do IAF estimado, o que não ocorreu aqui. A explicação para este fato reside na pouca sensibilidade do modelo às alterações do IAF, a qual pode ser constatada pela proximidade dos valores mínimos da função mérito.

Para o dossel de Peroba+ Eucalipto, cujos dados relativos às estimativas de IAF através da inversão do modelo encontram-se apresentados na Tabela 4.20, as interpretações são semelhantes às aquelas apresentadas para os dados contidos nas tabelas anteriores (4.18 e 4.19), destacando-se que para este dossel não foram verificadas diferenças muito grandes entre os desempenhos do modelo, como pode ser observado na Tabela 4.17. Conseqüentemente, as estimativas dos IAFs não foram muito distintas entre os dois desempenhos para cada banda.

GOEL e THOMPSON (1984a, 1984b, 1984c, 1984d) efetuaram a inversão o modelo SAIL para a estimativa de parâmetros biofísicos de dosséis de culturas agrícolas. Os autores ressaltaram a necessidade da existência de um modelo de reflectância da vegetação que represente, com um máximo de fidelidade e precisão, os fenômenos intrínsecos da interação da REM com a vegetação para alcançar sucesso nesta estimativa, via sua inversão. O modelo SAIL foi considerado por estes

autores ainda passível de implementações no sentido de torná-lo mais representativo da interação mencionada.

TABELA 4.20 ESTIMATIVAS DE IAF PARA DOSSEL DE PEROBA+EUCALIPTO

Banda 1		Melhor Desempenho		Pior Desempenho	
IAF inic.	IAF est.	Função	IAF est.	Função	
0,5	14,050	43,757	19,651	46,116	
3	10,950	43,757	10,900	46,116	
5	9,537	43,757	9,750	46,116	
8	8,019	43,757	8,000	46,116	
10	9,997	43,757	9,897	46,116	
15	15,100	43,757	15,101	46,116	
Banda 2					
0,5	13,775	227,185	12,450	247,884	
3	10,900	227,185	12,450	247,884	
5	9,750	227,185	9,750	247,884	
8	8,075	227,186	8,075	247,884	
10	10,006	227,185	9,895	247,884	
15	15,050	227,186	15,050	247,884	
Banda 3					
0,5	13,750	28,274	14,088	43,532	
3	12,450	28,274	12,450	43,532	
5	9,750	28,274	9,750	43,532	
8	8,200	28,274	8,200	43,532	
10	10,009	28,274	10,009	43,532	
15	15,126	28,274	15,125	43,532	
Banda 4					
0,5	0,096	13,865	0,0346	9,277	
3	0,096	13,865	0,0346	9,277	
5	0,096	13,865	0,0346	9,277	
8	0,096	13,865	0,0345	9,277	
10	0,096	13,865	0,0345	9,277	
15	0,096	13,865	0,0346	9,277	

## 5 CONCLUSÕES

Neste item são apresentadas as conclusões deste trabalho segundo as hipóteses formuladas.

### 5.1 DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DOS DOSSÉIS

#### 5.1.1 Parâmetros biofísicos:

Na análise de sensibilidade os resultados demonstraram que com o aumento do valor do IAF, houve uma diminuição da reflectância na região do visível e um aumento na região do infravermelho. Esse efeito não foi evidente na reflectância medida dos dosséis devido à influência de outros parâmetros sobre suas reflectâncias, tais como sombras (região do visível) e orvalho (região do infravermelho).

A avaliação da ação do aumento ou diminuição do ângulo de inclinação foliar deve ser considerada conjuntamente com a densidade do dossel (maior ou menor IAF) e com as geometrias de iluminação e visada. Para um dossel denso, iluminação oblíqua (maior  $\theta_s$ ) e visada vertical ( $\theta_v = 0^\circ$ ), o aumento do ângulo de inclinação foliar acarretou um aumento da reflectância do dossel. Para a mesma situação e uma iluminação menos oblíqua, o aumento deste ângulo acarretou uma diminuição na reflectância do dossel. Em condições de visada fora da vertical (maior  $\theta_v$ ), o aumento do ângulo de inclinação das folhas acarretou o mesmo efeito descrito para a visada vertical.

### 5.1.2 Parâmetros espectrais

A consideração da média aritmética entre as reflectâncias espectrais das folhas de Eucalipto e de Peroba, para a determinação da reflectância espectral do dossel constituído por mudas destas duas espécies, acarretou um maior distanciamento entre os VMRS e seus respectivos VCRs. Isto indicou que esta média não tem sentido físico no processo de interação entre a REM e a vegetação.

### 5.1.3 Parâmetros geométricos (da fonte e do sensor)

A avaliação do efeito da geometria de iluminação sobre a reflectância do dossel deve levar em consideração a densidade deste dossel, a disposição ou não das plantas em fileiras e a orientação destas fileiras (quando existirem) em relação aos azimutes de iluminação e de visada. Para dosséis densos e visada vertical, a diminuição do valor de  $\theta_s$  acarretou o aumento da reflectância do dossel, principalmente na região do visível. Na região do infravermelho, a comprovação deste efeito foi prejudicada pela presença do orvalho e sua evaporação coincidente com a diminuição dos valores de  $\theta_s$ . Para dosséis pouco densos e com plantas orientadas em fileiras equidistantes, como aquelas dos dosséis de Peroba e de Peroba+Eucalipto, o aumento da reflectância do dossel na região do visível, com a diminuição de  $\theta_s$ , foi atribuído à diminuição do sombreamento mútuo das mudas e do solo. Na região do infravermelho, ainda para este tipo de dosséis, houve também um aumento da reflectância do dossel com a diminuição de  $\theta_s$ , contudo não foi possível verificar se esse aumento foi,

exclusivamente, devido à  $\Theta_s$  ou à evaporação do orvalho presente na superfície das folhas.

O efeito do aumento de  $\Theta_v$  deve ser analisado conjuntamente com o valor de  $\psi$ . Para dosséis densos e  $\psi$  assumindo valores próximos a  $90^\circ$ , o aumento de  $\Theta_v$  acarretou o aumento da reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais. Com a diminuição de  $\psi$  (direção oposta à de retroespalhamento), o aumento de  $\Theta_v$  acarretou a diminuição da reflectância do dossel, tanto na região do visível quanto na região do infravermelho, para dosséis menos densos e com plantas dispostas em fileiras.

## 5.2 DO DESEMPENHO DO MODELO

Pelos resultados alcançados nos três diferentes tipos de dosséis e na análise de sensibilidade, concluiu-se que o valores de reflectância calculados pelo modelo foram próximos daqueles referentes às reflectâncias espectrais hemisféricas das folhas das espécies consideradas.

Os valores de reflectância medidos de cada dossel, nas diversas condições de iluminação e de visada, apresentaram-se mais distantes daqueles referentes às reflectâncias hemisféricas das folhas, o que indicou a ação de outros parâmetros (biofísicos, geométricos e eventuais como orvalho, por exemplo) sobre a reflectância espectral destes dosséis.

A subestimativa desta ação mencionada e a superestimativa da participação das propriedades espectrais das folhas, por parte do modelo, resultaram em diferenças entre os VMRs e seus respectivos VCRs freqüentemente

superiores à 10%, o que caracterizou os desempenhos do modelo como não satisfatórios.

A ocorrência de valores menores de RQMP nas regiões do azul e vermelho foi devido à menor variabilidade absoluta que a reflectância espectral da vegetação apresenta nestas regiões espectrais, isso conferiu ao modelo uma maior "chance" de determinar valores de reflectância mais próximos aos valores medidos.

A utilização de valores médios entre as reflectâncias hemisféricas de elementos do dossel (Peroba + Eucalipto) acarretou um maior desvio entre as reflectâncias medidas e as calculadas, em relação à consideração de cada elemento separadamente, cada qual com suas características espectrais individualizadas.

### 5.3 DA INVERSÃO DO MODELO

A análise de sensibilidade do modelo constituiu uma etapa fundamental para a compreensão dos resultados alcançados nesta etapa de inversão do modelo, uma vez que foi através dela que foi possível conhecer o efeito dos valores atribuídos ao IAF, por parte da rotina de minimização, sobre a reflectância calculada do dossel.

Diante dos desempenhos não satisfatórios do modelo, mesmo naqueles denominados de "melhor", os resultados da inversão foram também considerados não satisfatórios.



## 6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste item são apresentadas algumas sugestões e recomendações visando a condução de trabalhos futuros envolvendo a aplicação de modelos de reflectância da vegetação no estudo da reflectância espectral de dosséis.

### 6.1 DA ELABORAÇÃO OU ESCOLHA DOS DOSSÉIS

Entendendo que as diferentes possibilidades de caracterização dos parâmetros biofísicos ainda não foram totalmente exploradas, recomenda-se a elaboração de outros tipos de dosséis, tanto no que se refere à densidade de mudas, quanto às suas alturas e à composição florística, para que suas reflectâncias espectrais sejam avaliadas em função das geometrias de iluminação e de visada e de suas diferenças arquitetônicas.

A consideração de plantas de maior porte para a elaboração destes dosséis, deve ainda ser explorada. Isso implicará na adequação de metodologias destinadas à determinação dos parâmetros biofísicos e para a coleta de dados radiométricos. Para tanto faz-se mister o aprimoramento e a adaptação de metodologias envolvendo o uso de fotografias hemisféricas tomadas do interior destes dosséis, e o seu posterior processamento digital em aplicativos destinados à determinação do IAF, fundamentados no balanço de energia.

A disposição das plantas no terreno em termos espaciais e quantitativos deverá levar em consideração não só a trajetória solar, como também a aplicação de delineamento

estatístico que assegure uma maior confiabilidade à análise dos resultados.

## 6.2 DO MODELO DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO

Os aprimoramentos destes modelos têm sido constantes. Como consequência, novas versões têm se tornado disponíveis visando a adequação dos modelos às diferentes condições encontradas na natureza.

Para a vegetação de porte arbustivo e/ou arbóreo, ganham destaque as versões que consideram a existência de diferentes camadas horizontais (estratificação) e as diferentes proporções de sombra dentro do dossel.

## A P Ê N D I C E    A

DESCRIÇÃO DA SUBROTINA SCR DO MODELO SAIL

## DESCRIÇÃO DA SUBROTINA SCR

Para a descrição desta subrotina, optou-se em manter as declarações dos comandos em linguagem FORTRAN 77, acompanhados de comentários quando estes foram julgados necessários.

```

SUBROUTINE SCR (XL,LI,F,T8,T9,RO,TA,EM,ES,RS,PH,R)
REAL R(2,13),F(13)
INTEGER LI(13)

N = 1
X = 180.
AD = X*ATAN(1.)/45.

PI = AD ==> valor de  $\pi$  em radianos

X = PH
AD = X*ATAN(1.)/45.

PR = AD ==> azimuth relativo é transformado em
      radianos

C3 = COS(PR) ==> cosseno do azimuth relativo

X = T8
AD = X*ATAN(1.)/45.

A8 = TAN(AD) ==> tangente do zênite solar em
      radianos

X = T9
AD = X*ATAN(1.)/45.

A9 = TAN(AD) ==> tangente do zênite de visada
      em radianos

RT = (RO+TA)/2. ==> media entre  $\rho$  e  $\tau$ 

EI = EM+ES ==> soma % de irradiância difusa (SKYL)+
      irradiância direta

IE = 13
IF (N.EQ.2) THEN IE=2
ENDIF
W = 0.
X8 = 0.
X9 = 0.
G = 0.

```

Cálculo dos 9 coeficientes de extinção e espalhamento que aparecem nas equações diferenciais para o cálculo dos

fluxos ascendente e descendente difusos e especulares:

TT = a, Coeficiente de extinção para fluxos difusos;

SG =  $\sigma$ , Coeficiente de retroespalhamento para fluxos difusos;

SF(SB) = s, (s') Coeficientes de espalhamento para fluxos especulares descendente e ascendente;

UF, UB, W = u, v, w, Parâmetros da função fase;

X8(X9) = k(K), Coeficiente de extinção para fluxo especular em direção ao solo dentro do dossel e em direção ao sensor, respectivamente;

DO 10 IL=1, IE ==> IE= número de centros de classes da DAF

ALT = LI(IL) ==> valor do centro da classe em graus

X = ALT

AD = X\*ATAN(1.)/45.

ALR = AD ==> transforma centro da classe em radianos

S1 = SIN(ALR) ==> seno do centro da classe

C1 = COS(ALR) ==> cosseno do centro da classe

S2 = S1\*\*2

C2 = C1\*\*2

B8 = PI

B9 = PI

Início da averiguação sobre a geometria envolvida na interceptação da radiação eletromagnética pelas folhas, e a visada destas levando em consideração a DAF, ângulos de iluminação e visada.

IF (ALT.LT.90.) GO TO 2000

B8 = PI/2.

B9 = PI/2.

GO TO 2100

Se o ângulo central da classe da DAF (ALT) for  $\geq 90^\circ$ , as folhas estariam exatamente eretas ou com suas faces voltadas para cima. Para este caso em particular, o ângulo crítico B8 ( $\beta_s$ ) assumiria o valor de  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ), ou seja, este valor seria

utilizado em decisões posteriores, como será mencionado adiante.

```

2000 IF ((ALT+T8).LE.90.) GO TO 2500
      YC = -C1/(S1*A8)
      YS = SQRT(1.-YC**2)
      IF (YC.EQ.0) THEN AC=PI/2.
      ENDIF
      IF (YC.GT.0.) THEN
      AC = ATAN(YS/YC)
      ELSE
      AC=ATAN(YS/YC)+PI
      ENDIF
      B8 = AC

```

Cálculos  
adicionais

Se ALT for  $<90^\circ$  isso implicaria que as folhas teriam suas faces ventrais voltadas para cima. Inicia-se o cálculo de B8 ( $\beta_s$ ) levando-se em consideração o somatório entre ALT e s. Se este somatório for  $\leq 90^\circ$ , isto significa que a incidência da radiação estaria se dando sobre a face ventral em ângulos que poderiam variar de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , em relação à superfície da folha. Se este somatório for  $>90^\circ$ , a incidência da radiação estaria dando-se na face dorsal da folha. Para este último caso, seguem-se cálculos adicionais para a determinação do ângulo crítico B8 ( $\beta_s$ ), os quais encontram-se assinalados acima, mas que serão apresentados a seguir:

```

YC=-C1/(S1*A8)
YS=SQRT(1.-YC**2.)

```

Estas duas equações podem ser escritas da seguinte forma:

$$YC = -\cos(ALT) / [\sin(ALT) \cdot \tan(\theta_s)]$$

$$YS = [1 - (YC)^2]$$

Uma vez realizados estes cálculos, seguem-se as comparações:

```

IF(YC.EQ.0) THEN AC=PI/2
IF(YC.GT.0) THEN AC=ATAN(YS/YC)
ELSE AC=ATAN(YS/YC)+PI

```

Para  $YC=0$  tem-se que  $\cos(ALT)=0$ , o que leva a concluir que  $ALT=90^\circ$ , ou seja, as folhas devem estar eretas no dossel.

Neste caso ao ângulo crítico  $B8(\beta_s)$  seria atribuído o valor  $\pi/2$ , que representa o ângulo de  $90^\circ$  em radianos. Para que  $YC > 0$ , tem-se que a  $\tan(\theta_s) < 0$ , o que só aconteceria quando  $\theta_s > 90^\circ$ , ou seja, quando o ângulo zenital solar fosse  $> 90^\circ$ , o que não ocorre quando se convencionou a origem referencial deste ângulo como sendo a normal local, mas em ocorrendo o valor de  $B8(\beta_s)$  seria:

$$AC = \arctan\{[1 - (YC)^2] / [-\cos(ALT) / (\sin(ALT) \cdot \tan(\theta_s))]\}$$

Vale salientar que esta equação é equivalente a :

$$B8(\beta_s) = \arcsin[-\cot(\theta_s) \cdot \cot(ALT)]$$

Para que  $YC < 0$ , ter-se-ia que  $\tan(\theta_s) > 0$ , o que implicaria em  $\theta_s$  compreendido entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Neste caso ao valor de AC anteriormente calculado seria somado  $180^\circ$ .

```
2500 IF ((ALT+T9).LE.90.) GO TO 2100
      YC = -C1/(S1*A9)
      YS = SQRT(1.-YC**2)
      IF (YC.EQ.0) THEN AC=PI/2
      ENDIF
      IF (YC.GT.0.) THEN
        AC = ATAN(YS/YC)
      ELSE
        AC = ATAN(YS/YC)+PI
      ENDIF
      B9 = AC
```

O mesmo procedimento é adotado para o ângulo zenital de visada  $A9(\theta_v)$ , tendo como ângulo crítico  $B9(\beta_v)$ . As interpretações são exatamente as mesmas, exceto que o que se considera aqui é a visada do sensor e não a incidência da radiação sobre o dossel.

Vale salientar que para qualquer das decisões tomadas os valores de B8 e B9 seriam assumidos em função da geometria envolvida na interceptação da radiação eletromagnética com as folhas. Os cálculos que seguem ainda levam em consideração essa geometria e objetivam definir os valores a serem atribuídos a Z1, Z2 e Z3.

```

2100 B1 = ABS(B8-B9) ==> diferença entre ângulos críticos
      B2 = 2.*PI-B8-B9==> 360°- essa diferença

      IF (PR.GE.B1) GO TO 2200

      Z1 = PR ==> Z1=azimute relativo
      Z2 = B1 ==> Z2=diferença entre B8 e B9
      Z3 = B2 ==> Z3=360°-diferença entre B8 e B9
      GO TO 2300

2200 Z1 = B1 ==> Z1=diferença entre B8 e B9
      IF (PR.GE.B2) GO TO 2400
      Z2 = PR ==> Z2=azimute relativo
      Z3 = B2 ==> Z3=360°-diferença entre B8 e B9
      GO TO 2300

2400 Z2 = B2 ==> Z2=360°-diferença entre B8 e B9
      Z3 = PR ==> Z3=azimute relativo

```

Em B1 é armazenado o valor da diferença absoluta entre os ângulos críticos B8 e B9, enquanto que em B2 é armazenado o valor da diferença entre 360° e estes dois ângulos.

Se o azimute relativo PR for  $\geq B1$ , em Z1 seria armazenado o valor de B1 e seria perguntado se este mesmo azimute relativo seria também  $\geq$  a B2. Caso a resposta fosse afirmativa, em Z2 seria armazenado o valor de B2 e em Z3 o valor do azimute relativo; caso contrário, em Z2 ficaria o valor do azimute relativo e em Z3 o valor de B2. Se o azimute relativo fosse  $< B1$ , em Z1 ficaria o valor do azimute relativo, em Z2 o valor de B1 e em Z3 o valor de B2.

O que foi exposto anteriormente poderia ser escrito:

Se  $\psi \geq B1 \Rightarrow Z1=B1$

Se  $\psi \geq B2 \Rightarrow Z2=B2$  e  $Z3=\psi$

Se  $\psi < B2 \Rightarrow Z2=\psi$  e  $Z3=B2$

Se  $\psi < B1 \Rightarrow Z1=\psi$ ,  $Z2=B1$  e  $Z3=B2$

Final da averiguação sobre a geometria de interceptação da radiação eletromagnética que resulta na escolha dos valores de Z1, Z2 e Z3.

Início do cálculo dos coeficientes de extinção dos parâmetros da Função Fase.



2300 T1 = PI\*RO-Z2\*RT\*2  
 T2 = 2.\*RT\*SIN(Z2)

Estas equações podem ser escritas da seguinte forma:

$$T1 = \pi \cdot \rho_i - Z2(\rho_i + \tau_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \text{ comprimentos de onda}$$

$$T2 = (\rho_i + \tau_i) \sin(Z2)$$

Lembrando que Z2 poderá ser igual a B1,  $\psi$  ou B2, segundo as condições descritas anteriormente.

$$S = S2*A8*A9 \Rightarrow S = \sin^2(ALT) \tan(\theta_s) \tan(\theta_v)$$

$$Y = \cos(B8) * \cos(B9) \Rightarrow Y = \cos(\beta_s) \cos(\beta_v)$$

$$WH = 2 * T1 * C2 \Rightarrow WH = 2 [\pi \cdot \rho_i - Z2(\rho_i + \tau_i)] \cos^2(ALT)$$

$$W2 = 2 * T2 * S \Rightarrow W2 = 2 [(\rho_i + \tau_i) \sin(Z2)] \sin^2(ALT) \tan(\theta_s) \tan(\theta_v)$$

IF (ALT.NE.90.) THEN W2 = 2.\*T2\*C2/Y  
 ENDIF

Caso  $ALT \leq 90^\circ$ , tem-se que:

$$W2 = \frac{2 [(\rho_i + \tau_i) \sin(Z2)] \cos^2(ALT)}{\cos(\beta_s) \cos(\beta_v)}$$

$$W1 = (T1 * C3 + T2 * \cos(Z1) * \cos(Z3)) * S$$

Esta equação pode ser escrita:

$$W1 = \{ [\pi \cdot \rho_i - Z2(\rho_i + \tau_i)] \cos(\psi) + [(\rho_i + \tau_i) \sin(Z2)] \cos(Z1) \cos(Z3) \} \sin^2(ALT) \tan(\theta_s) \tan(\theta_v)$$

Lembrando que Z1 pode ser igual a e B1, enquanto Z3 pode ser igual a B2 e, dependendo do atendimento as condições descritas anteriormente.

$$WV = W1 + W2$$

Aqui o valor de  $W_2$  é dependente do valor de  $ALT$ , sendo assim, para o cálculo de  $WV$  podem ser consideradas as duas equações:

$$WV = W_1 + 2[(\rho_i + \tau_i) \sin(Z_2)] \sin^2(ALT) \tan(\theta_s) \tan(\theta_v)$$

ou

$$WV = W_1 + \frac{2[(\rho_i + \tau_i) \sin(Z_2)] \cos^2(ALT)}{\cos(\beta_s) \cos(\beta_v)}$$

Estes cálculos acima descritos servem então para o cálculo do parâmetro da Função Fase  $W$ , apresentado a seguir.

$$W = W + (WH + WV) * XL * F(IL) / (2 * PI)$$

Esta equação pode também ser escrita da seguinte forma:

$$W = W + (WH + WV) \text{ IAF.DAF} / (2 * \pi) \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \text{ classes da DAF}$$

Importante notar que o valor final de  $W$  é caracterizado para cada comprimento de onda, mas é o somatório de todos os seus valores calculados para cada frequência acumulada dos 13 centros de classes da DAF.

$$X_5 = (2./PI) * ((B_8 - PI/2.) * C_1 + SIN(B_8) * A_8 * S_1)$$

$$X_6 = (2./PI) * ((B_9 - PI/2.) * C_1 + SIN(B_9) * A_9 * S_1)$$

Ou seja:

$$X_5 = (2/\pi) [(\beta_s - \pi/2) \cos(ALT) + \sin(\beta_s) \tan(\theta_s) \sin(ALT)]$$

$$X_6 = (2/\pi) [(\beta_v - \pi/2) \cos(ALT) + \sin(\beta_v) \tan(\theta_v) \sin(ALT)]$$

Estes dois parâmetros,  $X_5$  e  $X_6$ , são utilizados para o cálculo dos coeficientes de extinção para os fluxos especulares descendente  $X_8$  (k) e ascendente  $X_9$  (K), apresentados a seguir.

$$X_8 = X_8 + X_5 * XL * F(IL) \Rightarrow X_8 = X_8 + X_5 * \text{IAF.DAF}$$

$$X_9 = X_9 + X_6 * XL * F(IL) \Rightarrow X_9 = X_9 + X_6 * \text{IAF.DAF}$$

Nota-se que a exemplo do cálculo realizado para o parâmetro da Função Fase ( $W$ ), ambos os coeficientes descritos

constituem somatórios para cada classe da DAF, ainda vale salientar que o cálculo de X8 leva em consideração o ângulo zenital solar ( $\theta_s$ ), enquanto que para X9 o ângulo considerado é o zenital de visada ( $\theta_v$ ).

$$G = G + F(IL) * C2 ==> G = G + DAF \cos (ALT)$$

10 CONTINUE ==> final dos cálculos para um dado centro da classe da DAF

Ao término deste looping, os parâmetros acima mencionados (W, X8, X9 e G) teriam sido determinados para um dado comprimento de onda, levando-se em consideração todas as classes da DAF. Tem início portanto o cálculo dos demais coeficientes de extinção e parâmetros da Função Fase.

$$BF = (RO - TA) / 2 * XL * G ==> BF = [(\rho - \tau) / 2] * IAF * G$$

Cálculo do coeficiente de extinção para fluxos difusos (a).

$$TT = (1 - RT) * XL + BF ==> TT = [1 - (\rho_i + \tau_i) / 2] * IAF + BF$$

Cálculo do coeficiente de retroespelhamento para fluxos difusos ( $\sigma$ ).

$$SG = RT * XL + BF ==> SG = [(\rho_i + \tau_i) / 2] * IAF + BF$$

Cálculo do coeficiente de espalhamento para fluxo especular descendente ( $s'$ ).

$$SB = X8 * RT + BF ==> SB = X8 * (\rho_i + \tau_i) / 2 + BF$$

Cálculo do coeficiente de espalhamento para fluxo especular ascendente (s).

$$SF = X8 * RT - BF ==> SF = X8 * (\rho_i + \tau_i) / 2 - BF$$

Cálculo dos demais parâmetros da Função Fase.

$$UB = X9 * RT + BF ==> UB = X9 * (\rho_i + \tau_i) / 2 + BF$$

$$UF = X9 * RT - BF ==> UF = X9 * (\rho_i + \tau_i) / 2 - BF$$

Tendo sido calculados todos os coeficientes e os parâmetros da Função Fase, tem início os procedimentos para o cálculo da reflectância do dossel, levando-se em consideração as contribuições especular e difusa da fonte de iluminação e do solo. Serão apresentados a seguir os comandos FORTRAN 77, assim como vinha sendo conduzida a redação desta seção, e em seguida serão apresentadas as principais fórmulas.

$$XM = \text{SQRT}(TT**2 - SG**2) ==> XM = (a^2 - \sigma^2)^{1/2}$$

$$H1 = (TT+XM)/SG ==> H1 = [a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}] / \sigma$$

$$H2 = 1./H1 ==> H2 = 1 / ([a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}] / \sigma)$$

$$C = (SF*SG - SB*(X8 - TT)) / (XM**2 - X8**2)$$

$$C = [s \cdot \sigma - s' (k - a)] / [(a^2 - \sigma^2) - s'^2]$$

$$D = (SB*SG + SF*(X8 + TT)) / (XM**2 - X8**2)$$

$$D = [s' \cdot \sigma + s (k + a)] / [(a^2 - \sigma^2) - s'^2]$$

$$E9 = EM - D * ES$$

$$E9 = \text{SKYL} - D \cdot (1 - \text{SKYL})$$

$$E8 = (RS * (D + 1.) - C) * ES * \text{EXP}(-X8)$$

$$E8 = [\rho_i (D + 1) - C] (1 - \text{SKYL}) \cdot e^{-k}$$

$$Y1 = H1$$

$$Y2 = H2$$

$$Y3 = (1. - RS * H1) * \text{EXP}(-XM)$$

$$Y3 = \{1 - \rho_{s_i} [(a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}) / \sigma]\} \cdot e^{-(a^2 - \sigma^2)^{1/2}}$$

$$Y4 = (1. - RS * H2) * \text{EXP}(XM)$$

$$Y4 = \{1 - \rho_{s_i} [1 / ((a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}) / \sigma)]\} \cdot e^{(a^2 - \sigma^2)^{1/2}}$$

$$DE = Y1 * Y4 - Y2 * Y3$$

$$DE = [(a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}) / \sigma] \{1 - \rho_{s_i} [1 / ((a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}) / \sigma)]\}.$$

$$e^{(a^2 - \sigma^2)^{1/2}} + \{1/[(a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2})/\sigma] \{1 - \rho_{s_i} [(a + (a^2 - \sigma^2)^{1/2})/\sigma]\} \} \cdot e^{-(a^2 - \sigma^2)^{1/2}}$$

$$A = (Y4 * E9 - Y2 * E8) / DE$$

$$B = (-Y3 * E9 + Y1 * E8) / DE$$

$$Q = X9 + X8$$

IF ((PH.EQ.0.).AND.(T9.EQ.T8)) THEN

$$Q = X9$$

ENDIF

Caso o valor do azimuth relativo entre o Sol e o sensor seja igual a zero e os ângulos azimutais de iluminação e visada sejam iguais entre si, em Q será armazenado somente o valor do Coeficiente de extinção do fluxo especular ascendente  $X9(K)$ .

$$X = X9 + XM \implies X = K + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}$$

$$XR = (1 - \exp(-X)) / X$$

$$EP = XR \implies EP = (1 - e^{-(K + (a^2 - \sigma^2)^{1/2})}) / (K + (a^2 - \sigma^2)^{1/2})$$

$$X = X9 - XM \implies X = K - (a^2 - \sigma^2)^{1/2}$$

$$XR = (1 - \exp(-X)) / X$$

$$EM = XR \implies EM = (1 - e^{-(K - (a^2 - \sigma^2)^{1/2})}) / (K - (a^2 - \sigma^2)^{1/2})$$

$$X = X9 + X8 \implies X = K + k$$

$$XR = (1 - \exp(-X)) / X$$

$$EK = XR \implies EK = (1 - e^{-(K+k)}) / (K+k)$$

$$X = Q \implies \text{pode ser } (K+k) \text{ ou } K$$

$$XR = (1 - \exp(-X)) / X$$

$$EQ = XR \implies \text{portanto } EQ = (1 - e^{-(K+k)}) / (K+k) \\ \text{ou}$$

$$EQ = (1 - e^{-K}) / K$$

$$X = Q + XM \implies X = (K+k) + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}$$

$$XR = (1 - \exp(-X)) / X$$

$$PE = XR \implies PE = (1 - e^{-[(K+k) + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}]}) / [(K+k) + (a^2 - \sigma^2)^{1/2}]$$

```

X=Q-XM==>X=(K+k)-(a2-σ2)1/2
XR=(1.-EXP(-X))/X
AME=XR==>AME=(1-e-[(K+k)-(a2-σ2)1/2])/[(K+k)-(a2-σ2)1/2]
X=Q+X8==>X=(K+k)+k
XR=(1.-EXP(-X))/X
AKE=XR==>AKE=(1-e-[(K+k)+k])/[(K+k)+k]

FP = A*PE+B*AME+C*AKE*ES

FM = H1*A*PE+H2*B*AME+D*AKE*ES

GP = A*EP+B*EM+C*EK*ES

GM = H1*A*EP+H2*B*EM+D*EK*ES

AMS = H1*A*EXP(-XM)+H2*B*EXP(XM)+D*ES*EXP(-X8)

R(N,2) = (UF*GP+UB*GM+W*EQ*ES)/EI*100.

R(N,5) = RS*(AMS*EXP(-X9)+ES*EXP(-Q))/EI*100.

RETURN
END

```

Os valores atribuídos a  $R(N,2)$  e  $R(N,5)$  são somados, resultando na Reflectância do dossel para um dado comprimento de onda. Todo o procedimento se repete para um número pré-estabelecido de comprimentos de onda.

## A P Ê N D I C E      B

ÁREAS DAS 100 FOLHAS UTILIZADAS PARA A ESTIMATIVA  
DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO LINEAR

## IAF - Eucalipto

Folha	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Folha	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )
1	27	5	1,10	26	20	10	1,71
2	47	19	6,03	27	32	7	1,65
3	65	23	10,86	28	32	8	1,68
4	58	27	9,24	29	25	8	1,29
5	65	21	8,91	30	63	29	11,80
6	49	21	7,46	31	62	26	10,93
7	64	29	12,64	32	60	19	8,05
8	45	11	3,36	33	54	19	6,98
9	62	21	9,07	34	50	16	5,64
10	33	11	2,67	35	54	16	5,90
11	40	12	3,47	36	82	37	19,37
12	62	20	8,72	37	60	26	10,88
13	49	15	5,64	38	46	17	5,20
14	62	18	7,27	39	47	15	5,06
15	62	22	9,53	40	42	19	6,25
16	46	17	5,86	41	55	22	8,47
17	60	26	11,22	42	72	19	9,92
18	70	33	16,16	43	56	21	8,22
19	62	16	7,31	44	30	8	1,69
20	46	22	7,03	45	62	37	15,29
21	59	16	6,71	46	47	16	5,45
22	75	28	13,99	47	39	11	3,19
23	50	18	6,53	48	35	9	2,23
24	44	10	3,51	49	25	9	1,63
25	34	8	2,06	50	61	19	7,88
51	60	21	8,58	76	52	17	5,85
52	35	8	2,15	77	40	10	2,62
53	60	22	9,11	78	45	11	3,01
54	31	10	2,33	79	55	18	7,06
55	66	26	12,06	80	62	19	8,61
56	57	21	8,00	81	49	16	5,66
57	60	19	7,97	82	63	22	9,72
58	67	18	8,35	83	53	20	7,28
59	61	20	9,00	84	29	9	3,82
60	52	18	7,59	85	37	12	2,95
61	58	18	6,87	86	46	14	4,63
62	58	20	7,51	87	80	26	14,82
63	43	17	5,57	88	67	21	8,57
64	68	31	14,95	89	64	26	11,48
65	62	20	8,76	90	60	17	7,52
66	49	31	10,32	91	65	22	10,50
67	23	7	1,31	92	53	20	7,59
68	74	25	11,98	93	64	19	8,52
69	48	16	5,09	94	47	18	5,50
70	50	15	5,54	95	36	13	3,50
71	66	23	10,53	96	33	9	2,39
72	54	22	8,01	97	52	18	6,91
73	59	21	8,41	98	72	39	19,89
74	74	24	11,73	99	68	32	15,82
75	58	19	7,92	100	75	22	12,73



## IAF - Peroba

Folha	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Folha	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )
1	58	20	8,25	26	72	24	13,51
2	73	21	11,20	27	45	13	4,58
3	60	22	9,91	28	55	19	8,06
4	60	18	6,56	29	72	23	11,20
5	38	15	4,09	30	46	16	5,29
6	75	24	12,57	31	46	20	6,80
7	54	16	6,62	32	76	26	14,47
8	65	19	9,20	33	93	34	22,15
9	70	20	9,86	34	49	19	6,47
10	92	34	22,57	35	54	18	6,48
11	65	28	13,45	36	44	16	5,18
12	74	22	11,61	37	55	15	6,01
13	47	12	5,75	38	61	18	7,77
14	44	18	5,75	39	52	19	6,92
15	79	25	14,21	40	83	22	13,16
16	76	24	13,31	41	71	39	20,37
17	46	17	5,58	42	50	20	7,10
18	74	26	13,90	43	36	12	3,07
19	86	22	14,42	44	39	13	3,65
20	51	15	5,42	45	37	18	4,76
21	34	12	3,30	46	57	18	6,74
22	69	27	12,63	47	43	14	4,48
23	75	24	13,08	48	32	15	4,18
24	75	23	11,87	49	52	15	5,57
25	45	13	4,76	50	76	25	13,33
51	70	24	12,12	76	42	14	4,42
52	54	15	5,99	77	64	20	9,58
53	44	16	4,84	78	78	22	12,80
54	77	29	15,32	79	48	14	4,84
55	63	20	8,87	80	68	23	11,25
56	40	19	5,17	81	67	24	11,50
57	36	15	3,90	82	55	21	8,16
58	41	13	3,90	83	75	24	12,50
59	87	25	15,43	84	55	15	6,30
60	87	29	17,16	85	45	16	5,80
61	69	21	11,14	86	39	13	3,62
62	76	23	13,05	87	29	13	2,79
63	47	16	5,53	88	55	16	6,98
64	47	17	6,34	89	34	14	3,42
65	50	17	5,96	90	54	21	8,43
66	77	23	12,96	91	29	12	2,73
67	88	28	17,61	92	35	16	4,06
68	70	26	12,53	93	42	12	3,75
69	86	27	16,33	94	31	12	2,64
70	45	15	5,05	95	36	15	3,74
71	59	21	8,64	96	38	19	5,61
72	81	26	14,58	97	46	15	4,80
73	53	20	7,60	98	31	13	2,85
74	39	16	4,51	99	40	14	4,20
75	52	21	7,79	100	36	15	4,27

## A P Ê N D I C E C

COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS VMrs E VCRs DO DOSSEL DE  
EUCALIPTO

-----

HORÁRIOS INICIAIS DAS BATERIAS DE MEDIÇÕES - VMRS

-----

08:06:49 08:25:38 08:41:11 09:50:46 10:00:32 12:36:54 12:48:30

-----

0,40	4,241	19,818	16,340	3,847	3,904	4,094	8,288
0,41	4,330	18,678	15,020	3,714	3,922	3,349	6,856
0,42	4,574	18,222	15,428	3,771	3,958	3,541	6,770
0,43	4,812	18,850	15,096	3,464	3,427	3,102	6,345
0,44	5,231	17,700	14,861	3,437	3,125	2,867	6,482
0,45	5,393	17,726	14,536	3,830	3,143	3,711	6,322
0,46	5,603	18,216	14,662	4,196	3,174	3,677	6,224
0,47	5,721	18,209	14,578	4,119	3,432	4,044	6,393
0,48	5,926	18,479	14,629	4,191	3,265	4,222	6,448
0,49	6,057	18,700	14,622	4,558	3,618	4,585	6,177
0,50	5,918	18,673	14,688	4,692	3,817	5,000	5,974
0,51	6,067	19,514	15,677	4,388	4,256	4,999	5,683
0,52	6,427	19,970	16,783	3,793	4,379	4,088	5,472
0,53	7,026	20,621	17,777	3,710	4,871	3,627	5,581
0,54	7,427	21,004	18,204	3,787	5,054	3,437	5,782
0,55	7,696	21,237	18,281	3,883	5,082	3,458	5,848
0,56	7,363	21,147	17,925	3,860	4,846	3,804	5,752
0,57	7,139	20,838	17,267	4,414	4,584	4,910	5,696
0,58	7,153	20,592	16,727	5,026	4,659	5,981	5,847
0,59	7,236	20,337	16,341	5,802	4,946	6,943	6,307
0,60	7,356	20,403	16,200	6,252	5,198	7,680	6,505
0,61	7,748	20,487	15,789	6,901	5,588	8,406	6,917
0,62	7,922	20,666	15,711	7,288	5,861	9,033	7,245
0,63	8,065	20,477	15,593	7,613	6,021	9,144	7,546
0,64	8,334	20,489	15,337	7,829	6,283	9,587	7,932
0,65	8,226	20,493	15,044	7,659	6,083	9,509	7,887
0,66	7,663	20,168	15,064	6,479	5,092	8,043	7,558
0,67	7,216	20,153	15,154	5,424	4,261	6,823	7,344
0,68	7,289	20,528	15,489	5,613	4,645	7,158	7,302
0,69	7,269	21,332	17,306	5,115	4,640	7,353	6,481
0,70	7,228	21,602	18,466	3,923	3,984	5,761	5,645
0,71	7,497	21,652	19,493	3,168	3,876	4,247	5,310
0,72	8,309	21,783	20,151	3,570	4,396	3,418	5,440
0,73	8,920	21,906	20,586	4,081	4,809	3,379	5,524
0,74	8,734	21,982	20,874	4,402	5,065	3,360	5,671
0,75	8,469	21,877	20,845	4,535	5,178	3,222	5,677
0,76	9,076	21,957	20,941	4,540	5,230	3,496	5,838
0,77	8,657	22,186	20,977	4,595	5,268	3,483	5,797
0,78	8,643	22,024	21,050	4,765	5,185	3,377	5,754
0,79	8,770	21,999	20,988	4,737	5,245	3,341	5,861
0,80	8,650	22,116	21,003	4,599	5,315	3,244	5,919
0,81	8,861	22,107	20,982	4,433	5,263	3,258	5,955
0,82	9,018	22,116	20,942	4,687	5,257	3,434	5,972
0,83	8,994	22,208	21,081	4,742	5,435	3,416	5,912
0,84	8,816	22,203	21,102	4,849	5,334	3,363	5,882
0,85	8,790	22,322	21,063	4,693	5,441	3,356	5,806
0,86	8,903	22,293	21,111	4,867	5,436	3,391	5,844
0,87	8,829	22,300	21,100	4,733	5,410	3,434	5,938
0,88	8,706	22,339	21,185	4,671	5,310	3,297	5,934
0,89	8,699	22,338	21,217	4,612	5,417	3,322	5,940
0,90	8,750	22,551	21,234	4,669	5,457	3,511	5,995

-----

-----

HORÁRIOS INICIAIS DAS BATERIAS DE MEDIÇÕES - VCRs

-----

08:06:49 08:25:38 08:41:11 09:50:46 10:00:32 12:36:54 12:48:30

-----

0,40	1,517	1,606	1,465	1,458	1,347	1,474	1,303
0,41	1,548	1,617	1,583	1,480	1,418	1,585	1,290
0,42	1,512	1,512	1,374	1,490	1,360	1,463	1,233
0,43	1,461	1,508	1,444	1,410	1,338	1,490	1,234
0,44	1,317	1,391	1,382	1,362	1,254	1,416	1,146
0,45	1,371	1,400	1,309	1,330	1,277	1,371	1,235
0,46	1,353	1,360	1,320	1,376	1,281	1,376	1,189
0,47	1,314	1,355	1,345	1,382	1,218	1,424	1,154
0,48	1,259	1,358	1,359	1,402	1,271	1,444	1,160
0,49	1,304	1,340	1,315	1,392	1,271	1,424	1,131
0,50	1,186	1,267	1,337	1,312	1,250	1,420	1,156
0,51	1,105	1,157	1,187	1,309	1,218	1,295	1,029
0,52	0,962	1,037	1,094	1,227	1,104	1,223	1,027
0,53	0,880	0,981	1,001	1,188	1,048	1,186	0,949
0,54	0,892	0,923	0,981	1,159	1,048	1,191	0,969
0,55	0,878	0,924	0,963	1,159	1,013	1,134	0,965
0,56	0,880	0,923	0,970	1,159	1,041	1,171	0,964
0,57	0,907	0,953	0,992	1,196	1,068	1,213	0,978
0,58	0,928	1,003	1,036	1,232	1,108	1,237	1,020
0,59	0,938	1,025	1,090	1,288	1,148	1,252	1,058
0,60	0,941	1,067	1,120	1,305	1,182	1,275	1,093
0,61	1,013	1,085	1,145	1,337	1,219	1,316	1,130
0,62	1,069	1,155	1,208	1,390	1,313	1,395	1,228
0,63	1,136	1,206	1,235	1,458	1,321	1,429	1,242
0,64	1,192	1,264	1,301	1,492	1,409	1,502	1,304
0,65	1,336	1,480	1,505	1,684	1,551	1,652	1,476
0,66	1,601	1,636	1,700	1,818	1,753	1,792	1,637
0,67	1,804	1,871	1,875	1,998	1,932	2,024	1,841
0,68	1,763	1,874	1,870	1,993	1,954	1,979	1,754
0,69	1,371	1,485	1,505	1,694	1,587	1,655	1,458
0,70	0,875	0,933	0,994	1,182	1,069	1,175	1,004
0,71	0,753	0,805	0,863	1,003	0,902	0,975	0,840
0,72	1,122	1,160	1,195	1,270	1,220	1,233	1,169
0,73	2,055	2,092	2,124	2,158	2,144	2,117	2,091
0,74	2,996	3,035	3,069	3,100	3,092	3,056	3,033
0,75	3,562	3,603	3,638	3,669	3,662	3,625	3,601
0,76	3,736	3,782	3,814	3,849	3,843	3,805	3,781
0,77	3,765	3,810	3,845	3,876	3,870	3,831	3,810
0,78	3,771	3,816	3,847	3,879	3,875	3,837	3,815
0,79	3,784	3,830	3,860	3,894	3,890	3,852	3,826
0,80	3,770	3,815	3,846	3,881	3,876	3,839	3,816
0,81	3,796	3,841	3,875	3,907	3,904	3,868	3,843
0,82	3,813	3,857	3,889	3,926	3,919	3,885	3,856
0,83	3,827	3,871	3,900	3,936	3,930	3,894	3,869
0,84	3,854	3,901	3,931	3,967	3,963	3,924	3,899
0,85	3,884	3,931	3,960	3,997	3,991	3,955	3,926
0,86	3,916	3,961	3,993	4,029	4,024	3,984	3,958
0,87	3,943	3,988	4,020	4,055	4,049	4,015	3,986
0,88	3,944	3,991	4,021	4,058	4,051	4,015	3,989
0,89	3,965	4,013	4,047	4,082	4,076	4,042	4,014
0,90	3,943	3,989	4,019	4,056	4,052	4,019	3,991

-----

## A P Ê N D I C E      D

COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS VMRS E VCRs DO DOSSEL DE  
PEROBA

---

 HORÁRIOS INICIAIS DAS BATERIAS DE MEDIÇÕES - VMRs
 

---

	09:17:33	09:09:21	09:20:00	09:13:23	09:20:03	09:24:10	14:10:06	14:18:22	15:13:56
0,40	6,355	6,652	6,200	6,696	7,501	6,321	20,369	12,338	8,181
0,41	6,864	7,157	6,192	6,130	6,902	5,697	20,361	11,946	6,867
0,42	6,786	7,217	6,891	6,113	5,941	6,057	21,398	12,748	8,022
0,43	7,336	7,243	6,273	5,754	6,324	6,306	21,396	12,596	7,805
0,44	7,345	7,015	6,234	5,932	6,048	5,070	21,600	12,919	8,047
0,45	8,300	6,784	6,752	5,636	6,040	5,900	22,431	12,626	7,626
0,46	8,882	6,751	6,559	5,532	6,129	5,981	22,789	13,015	8,036
0,47	9,115	6,613	6,910	5,565	5,983	6,065	22,986	12,645	8,066
0,48	9,587	6,291	6,485	5,492	5,910	6,360	24,117	12,831	8,455
0,49	10,013	6,377	6,629	5,467	5,990	6,122	24,206	12,888	7,952
0,50	10,445	6,625	6,801	5,717	6,064	6,345	24,389	12,840	7,737
0,51	10,830	6,626	5,428	6,396	6,884	6,260	24,749	12,957	7,050
0,52	11,490	7,321	4,430	7,440	8,156	6,060	24,617	13,281	6,625
0,53	11,876	8,179	3,612	7,916	8,728	5,921	24,520	13,655	6,184
0,54	12,244	8,272	3,533	7,908	8,952	6,162	25,075	13,857	6,171
0,55	12,776	7,935	3,672	7,516	8,780	5,993	25,610	13,947	6,405
0,56	13,196	7,218	3,956	7,364	8,002	5,905	26,272	13,517	6,327
0,57	13,396	6,114	5,007	6,289	6,691	6,361	27,274	13,055	6,600
0,58	13,672	5,787	5,862	5,821	5,823	6,820	28,164	12,866	6,681
0,59	13,985	6,085	6,785	5,264	5,318	7,237	28,966	13,188	6,950
0,60	14,471	6,373	7,356	5,254	5,410	7,373	29,433	13,234	6,744
0,61	14,706	6,772	7,746	4,922	5,412	7,767	29,779	13,284	6,704
0,62	14,936	7,412	8,124	4,761	5,810	8,212	30,278	13,557	6,718
0,63	15,427	7,701	8,248	4,896	6,029	8,149	30,685	13,587	6,792
0,64	15,871	8,620	8,644	4,618	6,322	8,618	30,808	13,783	7,100
0,65	15,534	8,899	9,292	4,623	6,727	9,153	30,796	13,998	6,931
0,66	16,015	9,444	9,092	4,923	7,282	9,172	30,474	14,366	7,172
0,67	16,107	9,672	8,958	4,608	7,189	9,049	30,305	14,110	6,849
0,68	16,248	8,953	8,555	4,994	6,792	8,829	30,537	14,489	7,199
0,69	17,113	5,973	6,736	5,264	5,581	7,045	31,885	13,390	7,168
0,70	17,950	5,824	4,633	5,706	7,699	5,484	31,658	13,912	7,549
0,71	18,543	8,072	3,483	6,741	10,017	4,240	30,904	15,096	7,989
0,72	19,183	9,654	3,413	7,528	11,530	3,735	30,166	16,005	8,568
0,73	19,777	10,603	3,566	8,258	12,310	3,531	29,570	16,647	8,681
0,74	20,017	11,181	3,773	8,676	12,735	3,532	28,895	17,096	8,706
0,75	19,827	11,212	3,752	8,670	12,688	3,606	29,021	17,109	8,772
0,76	20,735	11,358	3,991	8,806	12,914	3,583	29,053	17,304	8,987
0,77	21,103	11,671	3,996	9,177	13,118	3,412	28,968	17,514	9,177
0,78	21,061	11,560	4,125	8,904	12,827	3,307	28,827	17,586	8,861
0,79	20,692	11,251	4,382	8,601	12,656	3,977	29,300	17,339	8,962
0,80	21,231	11,760	4,417	8,155	13,184	3,610	29,366	17,901	8,814
0,81	21,602	11,601	4,189	8,612	13,048	3,639	29,899	17,880	8,910
0,82	22,291	11,493	4,235	8,829	13,140	3,572	30,008	17,776	9,261
0,83	22,681	11,508	4,215	8,908	13,191	3,520	29,929	17,732	9,215
0,84	22,997	11,582	4,243	8,976	13,150	3,523	29,883	17,820	9,263
0,85	23,199	11,564	4,195	8,949	13,056	3,679	29,987	17,897	9,163
0,86	23,592	11,718	4,289	9,094	13,243	3,660	29,847	18,030	9,144
0,87	23,386	11,779	4,340	9,141	13,253	3,648	29,905	18,145	9,247
0,88	23,466	11,836	4,391	9,316	13,371	3,437	30,040	18,508	9,317
0,89	23,518	11,816	4,641	9,229	13,286	3,293	30,550	18,445	9,177
0,90	23,769	11,713	4,332	9,128	13,222	3,775	30,780	18,475	9,425

---

---

 HORÁRIOS INICIAIS DAS BATERIAS DE MEDIÇÕES - VCRs
 

---

	08:17:33	09:09:21	09:20:00	09:13:23	09:20:03	09:24:10	14:10:06	14:18:22	15:13:56
0,40	7,160	8,062	4,071	8,109	7,997	7,987	8,261	8,097	6,386
0,41	7,427	8,302	4,205	8,419	8,306	8,249	8,526	8,392	6,619
0,42	7,472	8,358	4,234	8,412	8,314	8,317	8,547	8,378	6,660
0,43	7,846	8,804	4,382	8,872	8,732	8,688	8,978	8,802	7,008
0,44	7,874	8,839	4,493	8,924	8,828	8,737	9,026	8,830	7,028
0,45	7,670	8,601	4,333	8,647	8,552	8,533	8,807	8,573	6,838
0,46	7,553	8,364	4,238	8,472	8,328	8,290	8,584	8,412	6,656
0,47	7,426	8,302	4,168	8,392	8,292	8,204	8,465	8,243	6,552
0,48	7,406	8,270	4,168	8,322	8,199	8,141	8,431	8,221	6,501
0,49	7,126	7,927	3,960	8,026	7,892	7,857	8,114	7,887	6,236
0,50	6,070	6,730	3,358	6,802	6,664	6,611	6,817	6,601	5,133
0,51	4,343	4,727	2,392	4,806	4,652	4,548	4,798	4,536	3,336
0,52	2,429	2,288	1,577	2,420	2,195	2,087	2,297	2,022	1,196
0,53	2,011	1,866	1,670	1,978	1,779	1,658	1,871	1,568	1,133
0,54	2,026	1,890	1,760	1,996	1,818	1,723	1,903	1,650	1,326
0,55	1,937	1,815	1,672	1,931	1,760	1,642	1,840	1,554	1,181
0,56	1,971	1,837	1,564	1,950	1,738	1,613	1,834	1,519	0,957
0,57	2,497	2,460	1,510	2,589	2,407	2,292	2,486	2,184	1,317
0,58	3,686	3,983	2,015	4,069	3,928	3,836	4,019	3,760	2,678
0,59	4,651	5,105	2,546	5,192	5,056	4,961	5,164	4,919	3,654
0,60	5,204	5,776	2,848	5,877	5,711	5,646	5,860	5,609	4,284
0,61	6,239	6,992	3,468	7,053	6,917	6,838	7,085	6,839	5,314
0,62	6,823	7,657	3,812	7,725	7,587	7,505	7,761	7,513	5,915
0,63	7,447	8,334	4,198	8,407	8,286	8,228	8,465	8,236	6,556
0,64	8,129	9,165	4,641	9,197	9,089	9,028	9,293	9,064	7,290
0,65	8,979	10,093	5,114	10,131	10,000	9,962	10,230	9,992	8,144
0,66	10,491	11,778	6,041	11,772	11,677	11,654	11,954	11,725	9,699
0,67	11,338	12,732	6,579	12,722	12,618	12,593	12,913	12,698	10,574
0,68	12,196	13,618	7,065	13,622	13,521	13,507	13,847	13,656	11,415
0,69	10,172	11,419	5,871	11,447	11,319	11,296	11,575	11,385	9,365
0,70	5,849	6,607	3,287	6,661	6,542	6,490	6,679	6,431	5,037
0,71	2,257	2,505	1,396	2,610	2,454	2,356	2,477	2,193	1,373
0,72	2,005	2,178	1,725	2,198	2,153	2,129	2,305	2,120	2,004
0,73	3,519	3,954	2,517	3,925	3,918	3,936	4,124	3,982	3,678
0,74	4,793	5,381	3,165	5,341	5,359	5,382	5,600	5,446	4,957
0,75	6,068	6,809	3,821	6,763	6,783	6,819	7,055	6,884	6,214
0,76	6,408	7,187	3,978	7,132	7,152	7,190	7,451	7,261	6,543
0,77	6,510	7,302	4,027	7,247	7,268	7,304	7,563	7,378	6,650
0,78	6,476	7,260	4,020	7,213	7,226	7,262	7,522	7,335	6,610
0,79	6,498	7,294	4,034	7,241	7,258	7,294	7,552	7,364	6,632
0,80	6,558	7,361	4,070	7,306	7,330	7,361	7,621	7,435	6,691
0,81	6,576	7,385	4,077	7,331	7,351	7,378	7,656	7,457	6,711
0,82	6,683	7,506	4,139	7,452	7,469	7,504	7,800	7,582	6,822
0,83	6,730	7,561	4,162	7,506	7,526	7,553	7,848	7,634	6,869
0,84	6,740	7,566	4,166	7,512	7,529	7,567	7,847	7,640	6,869
0,85	6,754	7,591	4,176	7,530	7,553	7,583	7,885	7,661	6,890
0,86	6,846	7,693	4,225	7,638	7,662	7,684	8,008	7,775	6,980
0,87	6,879	7,728	4,253	7,670	7,688	7,723	8,035	7,807	7,009
0,88	6,895	7,748	4,257	7,694	7,701	7,739	8,050	7,834	7,017
0,89	6,887	7,745	4,256	7,689	7,703	7,739	8,043	7,819	7,019
0,90	6,935	7,789	4,277	7,736	7,759	7,787	8,109	7,877	7,060

---

## A P Ê N D I C E E

COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS VMRS E VCRs DO DOSSEL DE  
PEROBA+EUCALIPTO



-----  
 HORÁRIOS INICIAIS DAS BATERIAS DE MEDIÇÕES - VMRS  
 -----

08:43:10 08:48:08 08:51:52 10:30:40 10:36:00 10:40:42  
 -----

0,40	10,741	3,546	7,243	3,235	3,388	3,138
0,41	11,210	4,012	7,418	3,369	3,241	3,087
0,42	11,091	4,569	6,841	3,565	3,025	3,300
0,43	10,508	4,221	7,486	3,752	3,451	3,297
0,44	10,489	4,781	8,217	3,661	3,230	3,412
0,45	10,594	4,778	8,104	3,870	3,371	3,144
0,46	10,819	5,219	8,467	3,991	3,494	3,344
0,47	10,836	5,092	8,598	4,007	3,582	3,056
0,48	10,907	5,244	8,981	4,032	3,111	2,768
0,49	11,288	5,412	9,476	4,291	2,951	2,879
0,50	11,168	5,923	8,903	4,622	3,156	3,010
0,51	11,007	6,138	5,518	4,963	2,578	3,264
0,52	11,252	6,768	3,004	5,301	2,568	3,558
0,53	11,750	7,254	3,097	5,452	2,659	3,790
0,54	11,841	7,385	3,200	5,556	2,623	3,637
0,55	11,851	7,088	2,825	5,674	2,404	3,621
0,56	11,719	6,677	2,381	5,675	2,455	3,502
0,57	11,165	6,568	5,408	5,848	3,095	3,331
0,58	10,983	6,745	8,286	6,261	3,871	3,339
0,59	11,294	7,027	11,007	6,803	5,111	3,173
0,60	11,395	7,305	12,701	7,226	5,626	3,313
0,61	11,406	7,971	15,246	7,788	6,632	3,444
0,62	11,762	8,432	16,856	8,258	7,407	3,737
0,63	11,876	8,739	17,721	8,393	7,755	3,829
0,64	12,336	8,975	19,977	8,740	8,336	4,081
0,65	12,588	9,352	22,205	8,871	8,853	4,254
0,66	13,134	9,706	23,110	9,134	9,434	4,538
0,67	13,221	9,631	22,043	9,095	9,234	4,576
0,68	12,738	9,131	19,543	8,525	8,755	3,936
0,69	11,488	6,858	7,754	6,892	5,549	2,963
0,70	12,426	5,465	4,131	5,978	2,390	3,174
0,71	14,164	5,559	8,390	5,857	2,038	3,956
0,72	15,417	6,592	10,497	6,370	3,755	4,573
0,73	16,252	7,414	11,516	6,811	5,006	4,949
0,74	16,862	7,958	12,012	7,051	5,683	5,255
0,75	17,086	8,058	12,181	7,185	5,741	5,370
0,76	16,993	8,435	11,956	7,222	6,296	5,338
0,77	17,543	8,650	11,450	7,123	6,626	5,669
0,78	17,782	8,954	11,295	7,222	6,323	5,911
0,79	18,002	8,780	11,348	7,126	6,501	5,605
0,80	17,154	8,686	11,890	7,405	6,642	5,450
0,81	17,301	8,766	11,921	7,424	6,529	5,558
0,82	17,262	8,857	11,858	7,252	6,770	5,635
0,83	17,324	9,092	11,662	7,183	6,918	5,624
0,84	17,268	9,058	11,679	7,139	6,934	5,633
0,85	17,371	9,132	11,546	7,106	7,100	5,615
0,86	17,422	9,173	11,520	7,152	7,153	5,610
0,87	17,340	9,207	11,476	7,152	7,161	5,598
0,88	17,287	9,220	11,528	6,972	7,007	5,640
0,89	17,141	8,976	11,582	7,015	7,044	5,791
0,90	17,116	8,983	11,334	6,938	7,143	5,575

-----

-----  
 HORÁRIOS INICIAIS DAS BATERIAS DE MEDIÇÕES - VCRs SAIL  
 -----

08:43:10 08:48:08 08:51:52 10:30:40 10:36:00 10:40:42  
 -----

0,40	3,629	3,540	3,590	3,448	3,351	2,883
0,41	3,668	3,591	3,666	3,462	3,394	2,924
0,42	3,552	3,479	3,623	3,321	3,341	2,847
0,43	3,609	3,574	3,611	3,422	3,329	2,860
0,44	3,618	3,462	3,571	3,357	3,297	2,847
0,45	3,454	3,309	3,341	3,199	3,146	2,753
0,46	3,369	3,319	3,340	3,137	3,085	2,655
0,47	3,396	3,270	3,344	3,195	3,075	2,613
0,48	3,361	3,277	3,331	3,155	3,078	2,644
0,49	3,318	3,285	3,283	3,091	2,984	2,591
0,50	2,984	2,912	2,862	2,777	2,712	2,330
0,51	2,383	2,287	2,360	2,262	2,142	1,856
0,52	1,836	1,743	1,707	1,667	1,595	1,428
0,53	1,618	1,579	1,494	1,523	1,404	1,309
0,54	1,580	1,548	1,441	1,465	1,393	1,288
0,55	1,586	1,531	1,455	1,451	1,375	1,260
0,56	1,627	1,543	1,469	1,482	1,376	1,279
0,57	1,735	1,658	1,628	1,638	1,536	1,379
0,58	2,036	2,012	1,956	1,924	1,849	1,581
0,59	2,360	2,284	2,261	2,213	2,124	1,844
0,60	2,545	2,496	2,433	2,411	2,335	1,944
0,61	2,942	2,840	2,870	2,756	2,713	2,289
0,62	3,255	3,232	3,200	3,149	3,063	2,607
0,63	3,586	3,502	3,535	3,421	3,358	2,872
0,64	3,957	3,921	3,927	3,793	3,717	3,212
0,65	4,671	4,555	4,691	4,470	4,416	3,705
0,66	5,700	5,616	5,708	5,505	5,460	4,590
0,67	6,601	6,479	6,532	6,368	6,279	5,378
0,68	7,053	6,972	7,068	6,801	6,702	5,741
0,69	5,180	5,170	5,164	5,024	4,942	4,232
0,70	2,342	2,313	2,264	2,236	2,182	1,821
0,71	1,287	1,277	1,160	1,219	1,138	1,071
0,72	1,902	1,875	1,829	1,812	1,747	1,629
0,73	2,900	2,864	2,872	2,784	2,744	2,420
0,74	3,801	3,765	3,787	3,675	3,645	3,128
0,75	4,646	4,605	4,637	4,510	4,474	3,783
0,76	4,895	4,862	4,890	4,762	4,729	3,981
0,77	4,967	4,929	4,958	4,824	4,793	4,030
0,78	4,957	4,918	4,943	4,810	4,781	4,023
0,79	4,973	4,932	4,960	4,829	4,798	4,031
0,80	4,994	4,956	4,991	4,857	4,824	4,057
0,81	4,999	4,957	4,993	4,863	4,831	4,067
0,82	5,069	5,027	5,062	4,934	4,902	4,119
0,83	5,088	5,049	5,078	4,955	4,922	4,132
0,84	5,095	5,056	5,086	4,961	4,928	4,135
0,85	5,104	5,061	5,097	4,970	4,939	4,150
0,86	5,170	5,131	5,171	5,037	5,009	4,203
0,87	5,198	5,159	5,191	5,068	5,028	4,226
0,88	5,209	5,165	5,199	5,070	5,037	4,228
0,89	5,208	5,164	5,201	5,073	5,034	4,231
0,90	5,226	5,188	5,219	5,097	5,065	4,251

-----

HORÁRIOS INICIAIS DAS BATERIAS DE MEDIÇÕES - VCRs CANOPY						
08:43:10	08:48:08	08:51:52	10:30:40	10:36:00	10:40:42	
0,40	5,995	5,992	5,985	5,919	6,027	5,345
0,41	5,805	5,841	5,866	5,781	5,783	5,226
0,42	5,172	5,092	5,072	5,112	4,992	4,755
0,43	4,554	4,499	4,482	4,393	4,406	4,356
0,44	4,259	4,160	4,200	4,087	4,089	4,049
0,45	4,098	4,084	4,042	3,915	3,918	3,909
0,46	4,134	4,076	4,023	3,962	3,891	3,842
0,47	4,227	4,156	4,189	3,992	3,972	3,966
0,48	4,320	4,252	4,174	4,105	4,074	4,032
0,49	4,473	4,510	4,478	4,411	4,348	4,171
0,50	4,681	4,880	4,898	4,992	4,999	4,355
0,51	5,563	5,618	5,548	5,750	5,760	4,464
0,52	6,297	6,331	6,361	6,481	6,319	4,515
0,53	5,775	5,810	5,859	5,907	5,987	3,989
0,54	5,645	5,641	5,699	5,754	5,794	3,785
0,55	5,132	5,155	5,188	5,252	5,277	3,537
0,56	4,648	4,702	4,715	4,746	4,802	3,298
0,57	4,205	4,282	4,314	4,354	4,383	3,263
0,58	4,028	3,671	3,690	3,747	3,780	3,212
0,59	3,379	3,382	3,405	3,476	3,451	3,207
0,60	3,229	3,237	3,249	3,356	3,175	3,088
0,61	3,262	3,275	3,249	3,273	3,212	3,260
0,62	3,840	3,834	3,817	3,799	3,769	3,835
0,63	3,966	3,962	3,933	3,912	3,883	3,999
0,64	4,298	4,304	4,296	4,256	4,219	4,410
0,65	5,344	5,331	5,346	5,265	5,259	5,412
0,66	6,170	6,073	6,061	6,003	5,953	6,210
0,67	6,993	6,947	6,950	6,947	6,795	7,137
0,68	7,610	7,128	7,115	7,066	6,987	7,173
0,69	5,324	5,251	5,221	5,169	5,122	5,235
0,70	3,306	3,194	3,147	3,112	3,027	2,080
0,71	3,309	3,263	6,450	3,162	3,081	1,929
0,72	2,821	2,788	2,726	2,664	2,617	2,370
0,73	3,203	3,186	3,139	3,045	3,008	3,144
0,74	3,759	3,744	3,713	3,611	3,584	4,387
0,75	4,541	4,521	4,510	4,401	4,381	4,010
0,76	4,828	4,807	4,802	4,724	4,677	4,120
0,77	4,917	4,890	4,893	4,777	4,761	4,135
0,78	4,898	4,873	4,873	4,752	4,738	4,139
0,79	4,911	4,892	4,882	4,776	4,758	4,148
0,80	4,912	4,872	4,889	4,841	4,970	4,198
0,81	4,908	4,873	4,880	4,840	4,974	4,213
0,82	4,993	4,955	4,964	4,921	5,150	4,246
0,83	5,010	4,970	4,986	4,943	5,075	4,259
0,84	5,007	4,971	4,983	4,983	5,054	5,558
0,85	5,015	4,974	4,986	4,946	5,080	5,635
0,86	5,098	5,058	5,073	5,030	5,165	5,624
0,87	5,129	5,085	5,095	5,050	5,192	5,633
0,88	5,131	5,093	5,107	5,152	5,193	5,615
0,89	5,125	5,086	5,696	5,057	5,189	5,610

## GLOSSÁRIO

### Parâmetros biofísicos

IAF => Índice de Área Foliar

DAF => Distribuição Angular de Folhas

### Parâmetros espectrais

$\rho$  => reflectância hemisférica de folhas

$\tau$  => transmitância hemisférica de folhas

$\rho_s$  => reflectância hemisférica do solo

SKYL => fração de irradiância difusa

### Parâmetros geométricos

$\theta_s$  => ângulo zenital solar

$\psi_s$  => ângulo azimutal solar

$\theta_v$  => ângulo zenital de visada

$\psi_v$  => ângulo azimutal de visada

$\psi$  => ângulo azimutal relativo entre a fonte e o sensor

### Parâmetros gerais

REM => radiação eletromagnética

VMR => valor medido de reflectância

VCR => valor calculado de reflectância

PV => porcentagem de variação

CV => coeficiente de variação

KM => teoria Kubelka-Munk

RQM => raiz quadrada da média quadrática

RQMP => raiz quadrada da média quadrática padronizada

IFOV => "Instantaneous Field of View"

FI => fator de intercalibração

FC => fator de calibração

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, M.A.H. Aplicação dos modelo de reflectância SUITS e SAIL, no estudo do comportamento espectral da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). São José dos Campos. INPE - no prelo -, 1993.
- BADHWAR, G.D.; BUNNIK, N.J.J.; VERHOEF, W. Comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment*, 17: 179-195, 1985.
- BRAKKE, T.W.; OTTERMAN, J. Canopy bidirectional reflectance dependence on leaf orientation. *International Journal of Remote Sensing*. 11(6): 1023-1032, 1990
- BREECE, H.T.; HOLMES, R.A. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo. *Applied Optics*, 10: 119-127, 1971.
- BUNNIK, N.J.J. *The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties*. Wageningen, Netherlands. Medelinguen Land Bouwhogeschool, Wageningen 78-1, 1978. 175p.
- CHANCE, J.E. Applications of Suits spectral model to wheat. *Remote Sensing of Environment*, 6: 147-150, 1977.
- CHANCE, J.E.; LEMASTER, E.W. Plant canopy light absorption model with application to wheat. *Applied Optics*, 17: 2629-2636, 1978.
- CHANCE, J.E.; LEMASTER, E.W. Suits reflectance models for wheat and cotton theoretical and experimental tests. *Applied Optics*, 16(2): 407-412, 1977.
- CHANCE, J.E.; LEMASTER, E.W. A test of the Suits vegetative-canopy model with LARS soybean- canopy reflectance data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(5):665-672, 1985.
- COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 3:175-183, 1974.

- COLWELL, J.E. Grass canopy bidirectional spectral reflectance. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA. 1974 , pp 1061-1085.
- COOPER, K.; SMITH, J.A. A Monte Carlo reflectance model for soil surfaces with three-dimensional structure. *IEEE Transection Geoscience and Remote Sensing*. GE-23:668-673, 1985.
- CURRAN, P.J. Multispectral remote sensing for estimating biomass and productivity. In: SMITH, H. *Plants and the day lighth spectrum*. Academic Press, New York, p. 65-99. 1981.
- CURRAN, P.J.; WARDLEY, N.W. Radiometric leaf area index. *International Journal of Remote Sensing*. 9(2): 259-274, 1988.
- DANSON, M. Measuring the reflectance of a coniferous forest canopy. In: *Conference on Advanced Technology for Monitoring and Processing Global Environmental Data*. University of London, London. UK. Remote Sensing Society and CERMA, 10- 12 September, 1985. pp.39-47.
- DAUGHTRY, C.S.T. Direct measurements of canopy structure. In: *Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions*. *Remote Sensing Reviews*, 5(1): 45-60, 1990.
- DAUGHTRY, C.S.T.; HOLLINGER, S.E. Costs of measuring leaf area index of corn. LARS Technical Report, 030784, 1984.
- EATON, F.D.; DIRMHIRM, I. Reflected irradiance indicatrices of natural surfaces and their effects on Albedo. *Applied Optics*, 18: 994-1008, 1979.
- FUSCO, L.; TREVESE, D. On the reconstruction of lost data in images of more than one band. *International Journal of Remote Sensing*, 6(9): 1535-1544, 1985.
- FURKSHANSKY, L. Optical properties of plants. In: Smith, H (ed.) *Plants and the daylight spectrum*. London. Academic London. 1981, pp. 21-40.
- GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4(1): 11-20, 1965.

GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; CARDENAS, R. Reflectance of cotton leaves and their structure. *Remote Sensing of Environment*, 1: 19-22, 1969.

GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; WIEGAND, C.L.; ESCOBAR, D.E. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra and optical and geometrical parameters. Velasco, Texas. Dept. of Agriculture. Annual Report, 1971. 59p.

GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W. A.; WIEGAND, C. L.; ESCOBAR, D. E.; RODRIGUEZ, R.R.; RICHARDSON, A.J. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. U.S. Department of Agriculture. *Technical Bulletin* 1465, 1973.

GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. *Photogram. Engineering*, 183-191, 1974.

GOEL, N.S.; STREBEL, D.E. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables I: problem definition and initial results using Suits model. *Remote Sensing of Environment*, 13:487-507, 1983.

GOEL, N.S.; STREBEL, D.E. Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agronomy Journal*, 76:800-803, 1984.

GOEL, N.S.; THOMPSON, R.L. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables V: estimation of LAI and average leaf angle using measured canopy reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 16: 69-85, 1984a.

GOEL, N.S.; THOMPSON, R.L. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables III: estimation using only canopy reflectance data as illustrated by the Suits model. *Remote Sensing of Environment*, 15:223-236, 1984b.

GOEL, N.S.; STREBEL, D.E.; THOMPSON, R.L. Inversion of canopy reflectance models for estimating agronomic variables II: use of angle transforms and error analysis as illustrated by Suits model. *Remote Sensing of Environment*, 14:77-111, 1984c.

- GOEL,N.S.; THOMPSON,R.L. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables IV: total inversion of the SAIL model, *Remote Sensing of Environment*, 15:237-253, 1984d.
- GOEL,N.S.; DEERING,D.W. Evaluation of canopy reflectance model for LAI estimation through its inversion. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5): 674-721, 1985.
- GOEL,N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4:1-212, 1988.
- GOMES,F.P. *Curso de estatística experimental*. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura. Piracicaba, SP. 1978. 430p..
- HUETE,A.R. Soil influences in remotely sensed vegetation canopy spectra. In: *Theory and applications of optical remote sensing* (Asrar Ghassen) John Willey & Sons. New York, 1989. p. 107-141.
- JACKSON,R.D.; PINTER,J.R.; IDSO,S.B.; REGINATO,R.J. Wheat spectral reflectance: interactions between configuration, sun elevation and azimuth angle. *Applied Optics*, 18:3730-3732, 1979.
- KIMES,D.S.; KIRCHNER,J.A. Diurnal variations of vegetation canopy structure. *International Journal of Remote Sensing*, 4: 257-271, 1983.
- KIMES,D.S. Modeling the directional reflectance from complete homogenous vegetation canopies with various leaf orientation distributions. *Journal of American Optical Society*, A1:725-737, 1984.
- KNIPLING,E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infra-red radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1:155-159, 1970.
- KRIEBEL,K.T. Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surfaces. *Applied Optics*, 17: 253-260, 1978.



- KRUG, T. *Statistical approaches to the estimation of missing values arising in remotely sensed data*. Sheffield, U.K. PhD. Thesis. University of Sheffield, pp.65, 1992.
- KUMAR, R. *Radiation from plants, reflection and emission: a review*. Lafayette, Indiana. Purdue Research Foundation. Research Project n.5543, 1972, 88p.
- LILLESAETER, O. Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling. *Remote Sensing of Environment*, 12:247-254, 1982.
- LORD, D.; DESARDINS, R.L. DUBÉ, P.A. Influence of wind on crop canopy reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*. 18:113-123, 1985.
- MAJOR, D.J.; BEASLEY, B.W.; HAMILTON, R.I. Effect of maize maturity on radiation use efficiency. *Agronomy Journal*. 83(5):895-903, 1991.
- MAJOR, D.J.; SCHAALE, G.B.; WIEGAND, C.; BLAD, B.L. Accuracy and sensitivity analysis of SAIL model- predicted reflectance of maize. *Remote Sensing of Environment*. 41(11):61-70, 1992.
- NELDER, J.A.; NEAD, R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 7:308-313, 1965.
- NORMAN, J.M.; WELLES, J.M.; WALTER, E.A. Contrasts among bidirectional reflectances of leaves, canopies and soils. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*. GE-23: 659-668, 1985.
- NOVO, E. de M. *Sensoriamento remoto: principios e aplicaões*. São Paulo. Ed. Edgard Blücher., 308p., 1989.
- PINTER, P.J.; JACKSON, R.D. Dew and vapor pressure as complicating factors in the interpretation of spectral radiance from crops. In: *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. University of Michigan. Ann Arbor, Michigan, USA. 1981, 2: 547- 554.
- PINTER, P.J.; JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. Diurnal patterns of wheat spectral reflectances. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*. GE-21: 156-163, 1983.

- PINTER, P.J.; JACKSON, R.D.; EZRA, C.E.; GAUSMAN, H.W. Sun angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. *International Journal of Remote Sensing*. 6(12): 1813-1825, 1985.
- POTSCH, W.; POTSCH, C.; ARENS, K. *Botanica*. Rio de Janeiro. Fundação Alfredo Herculano Xavier Potsch. 11. ed., 1968. 373p..
- RAO, V.R.; BRACH, E.J.; MARCK, A.R. Bidirectional reflectance of crops and the soil contribution. *Remote Sensing of Environment*. 8:115-125, 1979.
- RANSON, K.J.; VANDERBILT, V.C.; BIEHL, L.L.; ROBINSON, B.F.; BAUER, M.E. Soybean canopy reflectance as a function of view and illumination geometry. In: *Proceedings of the 15th International Symposium of Remote Sensing of Environment*. University of Michigan. Ann Arbor, Michigan. USA. 1981. pp.853-865.
- RANSON, K.J.; BIEHL, L.L.; BAUER, M.E. Variation in spectral response of soybeans with respect to illumination, view and canopy geometry. *International Journal of Remote Sensing*. 6(12): 1827-1842, 1985.
- RANSON, K.J.; DAUGHTRY, C.S.T.; BIEHL, L.L. Sun angle, view angle and background effects on spectral response of simulated Balsan Fir canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 52(5): 649-658, 1986.
- SINCLAIR, T.R.; SCHREIBER, M.M.; HOFFER, R.M. Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves. *Agronomy Journal*, 65:276-283, 1973.
- SUITS, G.H. The calculation of the directional reflectance of vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2:117-125, 1972.
- THOMAS, J.R.; MYERS, V.I.; HEILMAN, M.D.; WIEGAND, C.L. Factors affecting lighth reflectance of cotton. In: *Proceedings of the Fourth Symposium on Remote Sensing of Environment*, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA. 1966, pp. 305-312.
- TUCKER, C.J.; GARRAT, M.W. Leaf optical system modeled as an stochastic process. *Applied Optics*, 16:635-642, 1977.

- VALERIANO, M de M. Reflectância espectral de trigo irrigado (*Triticum aestivum* L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL. São José dos Campos. INPE-5426 - TDI/483), 1992.
- VERHOEF, W.; BUNNIK, N.J.J. Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by the use of canopy reflectance models. In: *Proc. Int. Colloq. on Signatures of Remotely Sensed Objects*. Avignon France, Sept. 8-11. pp.273-290, 1981.
- VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16:125-141, 1984.
- WANJURA, D.F.; HATFIELD, J.L. Vegetative and optical characteristics of four-row crop canopies. *International Journal of Remote Sensing*. 9(2): 249-258, 1988.
- WARDLEY, N.W.; MILTON, E.J.; HILL, C.T. Remote sensing of structurally complex semi-natural vegetation: an example from heath land. *International Journal of Remote Sensing*. 8: 31-42, 1987.
- YANASSE, C.C.F. *Statistical analysis of synthetic aperture radar images and its applications to system analysis and change detection*. Sheffield, U.K. University of Sheffield. PhD. Thesis, 318p. 1991.